

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
UNIVERSITE ORAN 2 MOHAMED BEN AHMED
FACULTE DES SCIENCES DE LA TERRE ET DE L'UNIVERS



MEMOIRE
Pour l'obtention du diplôme de Master « L.M.D »
En Sciences de la Terre
Option : Hydrogéologie

**Étude comparative entre les méthodes d'interpolation
pour la cartographie de la piézométrie:
Cas d'application la nappe superficielle de la plaine de
Ghriss, Mascara (Nord-Ouest Algérien).**

Présenté par :

Bousmaha Mohammed
Salaa Abdelaziz

Dirigé par :

Mme Dekkiche Hafida

Devant le jury composé de :

M ^r Foukrache A.	MAA, Université d'Oran 2	Président
Mme Belkhire khadija	MAA, Université d'Oran 2	Examinatrice
Mme Dekkiche hafida	MCB, Université d'Oran 2	Encadreur

Année 2023/2024

Remerciements

Au terme de ce travail, Nous voudrions remercier en premier **DIEU (الله)** le tout puissant pour nous avoir donné la foi et le courage pour mener à bout ce travail, ainsi que celles et ceux qui ont contribué, chacun à sa façon, à surmonter les difficultés pour la réalisation de ce mémoire.

Un grand merci à madame Dekkiche Hafida maître de conférence à l'université Oran2, de nous avoir proposé ce sujet de mémoire et qui nous a aidé durant la préparation de ce travail.

Nos vifs remerciements également à monsieur Foukrache et madame Belkehir khadija maîtres assistants à l'université d'Oran2 d'avoir accepté d'examiner ce travail.

On tient à remercier tous les enseignants du département des sciences de la terre et tous mes amis.

Enfin, on remercie nos parents, qui nous ont soutenu et encourager constamment et a tous qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Merci à tous.

Liste des abréviations

I. Liste des abréviations :

- **ANRH** : Agence National des Ressources Hydrauliques.
- **SIG** : Système d'Information Géographique
- **IDW** : Inverse Distance Weighted
- **RBF** : Radial Basis Function
- **KU** : Krigeage Universel
- **MSE** : Mean Squared Error (Erreur quadratique moyenne)
- **RMSE** : Root Mean Squared Error (Erreur quadratique moyenne en racine)
- **MAE** : Mean Absolute Error (Erreur absolue moyenne)
- **ESDA** : Exploratory Spatial Data Analysis (Analyse exploratoire des données spatiales).

Liste des figures et des tableaux

II. Liste des figures

Figure	Page
Chapitre I	
Figure I. 1 : Schéma explicatif de l'interpolation spatiale (https://portailsig.org/)	2
Figure I. 2 : Figure illustrant la diminution du poids avec la distance	3
Figure I. 3 : Exemple d'interpolation RBF (Benaouali A. ; Kachel S., 2017)	4
Figure I. 4 : Exemple de semi-variogramme.	6
Figure I. 5 : Propriétés d'un variogramme.	7
Figure I. 6 : Modèles d'ajustement aux semi-variogrammes.....	7
Figure I. 7 : Processus de la validation croisée	13
Chapitre II	
Figure II. 1 : Situation géographique de la zone d'étude (Bouabssa N. ,2017)	15
Figure II. 2 : Carte géologique de la plaine de Ghriss (Bekkoussa et al. 2008).....	16
Figure II. 3 : Précipitations mensuelles moyennes interannuelles, pour les 3 stations : Matmore, Ghriss et Ain fekan du (1979 à 2016) en mm (Bouabssa N., 2017 ; Belabdi S, et al., 2022).....	18
Figure II. 4 : les précipitations interannuelles au niveau de trois stations climatique dans le plain de Ghriss entre 1979 au 2016 (Bouabssa N., 2017 ; Belabdi S, et al., 2022).....	19
Figure II. 5 : Coupe géologique et hydrogéologique de la plaine de Ghriss (ANRH, 2012 ; Lakhdari T., 2013).....	20
Figure II. 6 : Carte piézométrique de la plaine de Ghriss [basses eaux, 2009]. (GASMI A, BEN HAMI A. 2015)	23
Chapitre III	
Figure III. 1 : Localisation des puits étudiés sur la zone d'étude avec le logiciel ArcGis.....	26
Figure III. 2 : Schéma général présentant la démarche de l'étude.	27
Figure III. 3 : Diagramme de Voronoï par la méthode 'Cluster' avant et après élimination de données anormales.	28
Figure III. 4 : Histogramme et statistiques des données piézométriques brutes.	29
Figure III. 5 : Choix de la méthode et l'ensemble de données dans la méthode IDW.	29
Figure III. 6 : Paramètres de la méthode IDW	30
Figure III. 7: Validation croisée de la méthode IDW.....	30
Figure III. 8 : Choix de la méthode et l'ensemble de données dans la méthode RBF.....	31
Figure III. 9: Paramètres de la méthode RBF.....	31
Figure III. 10: Validation croisée de la méthode RBF.	32
Figure III. 11: Transformation des données brutes en données normalement distribuées.	33
Figure III. 12 : Identification d'une tendance dans les niveaux piézométriques selon la direction 45°	33
Figure III. 13: Variogramme expérimental omnidirectionnel.	34
Figure III. 14: Variogrammes directionnels selon les quatre directions 0°, 45°, 90° et 135°..	35
Figure III. 15: Carte variographique illustrant l'anisotropie dans l'ensemble de données.....	35
Figure III. 16: Variogrammes directionnels selon les quatre directions 0°, 45°, 90° et 135° et variance.	36

Liste des figures et des tableaux

Figure III. 17: variogramme expérimental et le modèle sphérique ajusté aux données piézométriques.	36
Figure III. 18: variogramme expérimental et le modèle gaussien ajusté aux données piézométriques.	37
Figure III. 19: Semi-variogramme expérimental et le modèle exponentiel ajusté aux données piézométriques.	37
Figure III. 20: Etapes de la calibration des modèles d'interpolation mises en œuvre dans l'interface du Geostatistical wizard.	38
Figure III. 21: Validation croisée mise en œuvre dans l'interface du Geostatistical wizard. ..	40
Figure III. 22: Comparaison de la validation croisée des trois modèles théoriques : gaussien, sphérique et exponentiel.	40
Figure III. 23: Carte des erreurs réduites de prédiction.	41
Figure III. 24: Les résultats de validation croisée fournis pour l'IDW, RBF et le krigeage universel gaussien.	42
Figure III. 25: Carte de piézométrie de la nappe superficielle de la plaine de Ghriss.	43

III. Liste des tableaux

Tableau III. 1 : Données piézométriques des basses eaux de la nappe supérieure de la plaine de Ghriss, année 2017/2018 (Source: ANRH Oran/ 2024)	25
Tableau III. 2: Caractéristiques des trois modèles de variogramme théorique.	37

Table des matières

Remerciements

- I. Liste des abréviations**
- II. Liste des figures**
- III. Liste des tableaux**
- IV. Résumé**
- V. Abstract**
- VI. Introduction générale**

Table des matières

Chapitre I Aperçu des méthodes d'interpolation.....	1
I.1 Introduction.....	2
I.2 Définition et principe.....	2
I.3 Différentes méthodes d'interpolation	2
I.3.1 Méthodes déterministes	3
I.3.1.1 Interpolation à pondération inverse de la distance (IDW).....	3
I.3.1.2. Interpolation par Fonction de Base Radiale (RBF).....	4
I.3.2 Méthodes géostatistiques.....	5
I.3.2.1 Semi- variogramme	5
I.3.2.2. Semi-Variogramme directionnel	6
I.3.2.3 Propriétés d'un semi-variogramme.....	6
I.3.2.4 Modèles de semi-variogramme.....	7
I.3.2.5 Krigeage	9
I.4 Évaluation de la qualité des méthodes d'interpolation	11
I.4.1 Métriques d'évaluation pour la méthode IDW	11
I.4.2 Métriques d'évaluation pour la méthode RBF	11
I.4.3 Métriques d'évaluation pour le krigeage	11
I.4.3.1 Validation	11
I.4.3.2 Validation croisée	12
I.5 Conclusion	13
Chapitre II Contexte géologique et hydrogéologique de la zone d'étude	14
II.1 Introduction.....	15
II.2 Situation géographique	15
II.3 Géologie de la région.....	16
II.4 Situation géomorphologique.....	17
II.5 Etude Climatique	18
II.5.1 La pluviométrie.....	18

Table des matières

II.5.1.1 Les pluies mensuelles	18
II.5.1.2 Les précipitations annuelles	18
II.6 Principaux aquifères dans la plaine de Ghriss	19
II.7. Fonctionnement du système aquifère de la plaine de Ghriss	21
II.7.1. Nappe superficielle.....	21
II.7.2. Nappe des calcaires lacustres, sables et grés du Pliocène	21
II.7.3. Nappe des calcaires et dolomies du Jurassique supérieur.....	22
II.8 Carte piézométrique.....	22
II.9 Conclusion	23
Chapitre III Comparaison des méthodes déterministes & géostatistiques.....	24
III.1 Introduction.....	25
III.2 Collecte des données.....	25
III.3 Démarche de l'étude	27
III.4 Analyse exploratoire des données piézométriques	28
III.4.1 Exploration des données piézométriques par le diagramme de Voronoï.....	28
III.4.2 Exploration des données piézométriques par l'outil Histogramme.....	28
III.3 Cartographie de la piézométrie par les méthodes déterministes.....	29
III.3.1 Cartographie de la piézométrie par la méthode IDW	29
III.3.1.1 Choix de la méthode et l'ensemble de données	29
III.3.1.2 Paramètres de la méthode IDW	30
III.3.1.3 Validation croisée	30
III.3.2 Cartographie de la piézométrie par la méthode RBF	31
III.3.2.1 Choix de la méthode et l'ensemble de données	31
III.3.2.2 Paramètres de la méthode RBF.....	31
III.3.2.3 Validation croisée	32
III.4 Cartographie de la piézométrie par les méthodes géostatistiques	32
III.4.1 Normalisation données	32
III.4.2 Analyse de tendance dans les données.....	33
III.4.3 Variogramme expérimental omnidirectionnel.....	34
III.4.4 Anisotropie	34
III.4.5 Ajustement du variogramme théorique et calibration du modèle	36
III.4.6 Validation croisée	39
III.4.7 Choix du meilleur modèle théorique.....	40
III.4.8 Carte des erreurs réduites de prédiction	41

Table des matières

III.5 Comparaison entre les trois méthodes d'interpolation.....	42
III.5.1 Résultats de la validation croisée.....	42
III.5.2 Comparaison par la fonction de régression.....	42
III.5.3 Comparaison par l'erreur de prédiction.....	42
III.6 Carte de piézométrie de la plaine de Ghriss.....	43
III.7 Conclusion.....	44
Conclusion Générale.....	46
Référence bibliographique.....	48

IV. Résumé

Située dans les plaines intérieures de l'ouest de l'Algérie, la **plaine de Ghriss** abrite un important réservoir d'eau souterrain, comprenant trois aquifères cruciaux pour l'approvisionnement en eau de Mascara.

Après avoir passé en revue les différentes **méthodes d'interpolation** et pris en compte le contexte géologique et **hydrogéologique** de la plaine de Ghriss, une comparaison entre les trois méthodes **IDW, RBF et le Krigeage universel** avec plusieurs modèles est faite, en utilisant le logiciel ArcGIS.

Grâce à cette analyse on constate que, le krigeage universel avec un modèle gaussien semble être plus adaptée que les deux méthodes IDW et RBF.

La carte piézométrique générée par le krigeage universel avec le modèle gaussien a permis de mettre en évidence des zones de surexploitation dans la région du centre et à l'Ouest de la plaine ainsi qu'une recharge d'eaux souterraines se produisant principalement dans le Nord-Est et le Sud-Est de la plaine.

Mots clé : *Plaine de Ghriss, hydrogéologie, piézométrie, interpolation, Pondération Inverse de la Distance, Fonction de Base Radiale, Krigeage Universel.*

V. Abstract

Located in the interior plains of western Algeria, the Ghriss plain is home to a large underground water reservoir, including three aquifers that are crucial to the water supply of Mascara.

After reviewing the various interpolation methods and taking into account the geological and hydrogeological context of the Ghriss plain, a comparison between the three methods IDW, RBF and universal Kriging with several models is made, using ArcGIS software.

This analysis shows that universal kriging with a Gaussian model seems to be more suitable than the IDW and RBF methods.

The piezometric map generated by universal kriging with the Gaussian model highlighted areas of overexploitation in the central and western regions of the plain, as well as groundwater recharge occurring mainly in the north-east and south-east of the plain.

Keywords: *Plain of Ghriss, hydrogeology, piezometry, interpolation, Inverse Distance Weighting, Radial Basis Functions, Universal Kriging.*

يقع سهل غريس في السهول الداخلية لغرب الجزائر ، ويضم خزاناً مهماً للمياه الجوفية ، بما في ذلك ثلاث طبقات مياه جوفية مهمة لتزويد ولاية معسكر بالمياه.

بعد مراجعة طرق الاستيفاء المختلفة ومراعاة السياق الجيولوجي و الهيدروجيولوجي لسهل غريس ، يتم إجراء مقارنة بين ثلاثة طرق إ.د.و (IDW) ، ر.ب.ف (RBF) و كريغينغ العالمي مع عدة نماذج ، وذلك باستخدام برنامج أركجيس . وبفضل هذا التحليل ، نلاحظ أن كريغينغ العالمي مع نموذج غاوسي يبدو أكثر تكيفاً من الطريقتين إ.د.و. و ر.ب.ف.

أتاحت الخريطة البيزومترية التي تم إنشاؤها بواسطة الكريغينغ العالمي مع النموذج الغاوسي (Gaussien) تسليط الضوء على مناطق الاستغلال المفرط في المنطقة الوسطى وإلى الغرب من السهل وكذلك إعادة تغذية المياه الجوفية التي تحدث بشكل رئيسي في الشمال الشرقي والجنوب الشرقي من السهل.

Introduction générale

VI. Introduction générale

La piézométrie est essentielle pour la gestion des ressources en eau, notamment pour l'exploitation durable des nappes souterraines, la prévention de l'épuisement des aquifères et la protection contre la contamination. C'est une composante cruciale pour la compréhension et la gestion des ressources en eau souterraines, jouant un rôle central dans les études hydrogéologiques et environnementales.

La génération de cartes piézométriques est donc une phase importante avant d'entamer toute étude hydrogéologique. En effet, la génération de cartes piézométriques est un processus crucial en hydrogéologie pour visualiser la distribution spatiale des niveaux d'eau souterraine et comprendre les dynamiques d'écoulement des aquifères.

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 analyse spatiale.

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 et Srivastava., 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 de données 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. Par exemple, Hutchinson (1991) a comparé l'interpolation de la pluie moyenne en utilisant des splines de lissage à plaque mince avec d'autres méthodes telles que l'interpolation polynomiale et le krigeage. Les résultats de telles études peuvent fournir des indications précieuses sur les forces et les faiblesses de chaque méthode dans des contextes spécifiques.

Introduction générale

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 certains cas, une approche hybride ou combinée peut être préférée, où différentes méthodes d'interpolation sont utilisées dans différentes parties de la région d'intérêt en fonction des caractéristiques locales des données. Cette approche peut permettre de tirer parti des avantages de chaque méthode tout en atténuant leurs limitations.

Dans cette étude, une comparaison entre les deux méthodes déterministes, à savoir la méthode IDW et la méthode RBF, ainsi qu'une méthode géostatistique est faite. L'objectif de cette étude étant de choisir la meilleure méthode d'interpolation pour la génération de la carte piézométrique de la nappe superficielle de la plaine de Ghriss, dans la wilaya de Mascara.

La Plaine de Ghriss se distingue par sa topographie plate, façonnée par des dépôts sédimentaires alluvionnaires argilo-sableux. Enclavée entre des reliefs formés par diverses formations géologiques, cette plaine occupe une position centrale au sein du bassin hydrologique de la Macta, englobant l'intégralité du sous-bassin de l'oued Fekan. La Plaine de Ghriss, nichée entre des reliefs montagneux, se distingue par ses caractéristiques hydrogéologiques uniques. Elle abrite des ressources en eau souterraine précieuses qui alimentent l'agriculture et la vie quotidienne des habitants.

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.

L'importance de la Plaine de Ghriss en tant que région agricole productive est donc indéniable, avec ses terres fertiles et son climat favorable.

Outre le résumé, l'introduction générale, et la conclusion générale, ce mémoire est structuré en trois 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 présente les principales étapes menées dans l'interpolation et ceci pour trois méthodes différentes. A la fin de ce chapitre, une comparaison des trois méthodes d'interpolation est faite. L'objectif étant de choisir la meilleure méthode pour la génération de la carte piézométrique de la plaine de Ghriss.

Chapitre I

Aperçu des méthodes d'interpolation

1.1 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).

1.2 Définition et principe

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 de données 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 I.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.

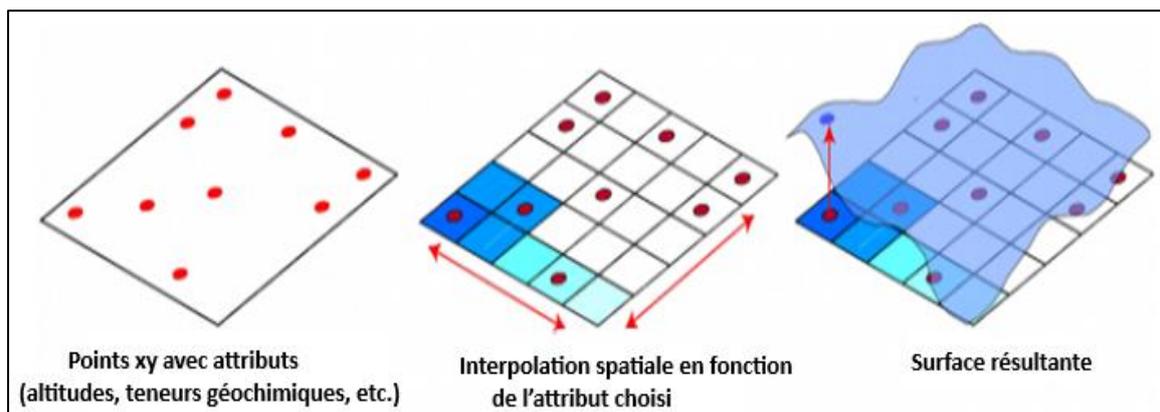


Figure I. 1 : Schéma explicatif de l'interpolation spatiale (<https://portailsig.org/>)

1.3 Différentes méthodes d'interpolation

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

I.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).

I.3.1.1 Interpolation à pondération inverse de la distance (IDW)

1. Principe

L'interpolation à pondération inverse de la distance (IDW) est une méthode d'interpolation déterministe qui attribue des poids aux points de données voisins en fonction de leur distance inverse à l'emplacement d'interpolation (figure I.2). La moyenne pondérée des valeurs observées est ensuite calculée pour estimer la valeur au point d'interpolation.

L'équation générale de l'interpolation IDW est donnée par (Shepard, D., 1968)

$$Z(x) = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{Z_i}{d_i^p}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i^p}} \quad (I.1)$$

Où :

- $Z(x)$ représente la valeur interpolée à l'emplacement x ,
- Z_i est la valeur de l'échantillon à la position i ,
- d_i est la distance entre l'emplacement x et l'échantillon i ,
- p est un paramètre de puissance contrôlant la décroissance de poids avec la distance.

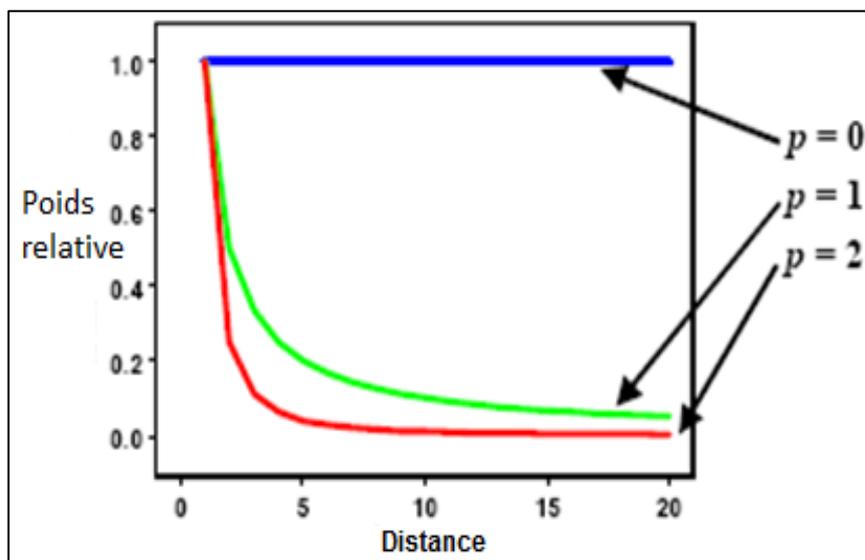


Figure I. 2 : Figure illustrant la diminution du poids avec la distance

2. Points forts

La méthode IDW est efficace sur le plan informatique et facile à mettre en œuvre. Elle fonctionne bien lorsque les données sous-jacentes présentent une tendance spatiale simple.

3. Limitation

La méthode IDW suppose une relation déterministe entre la distance et la valeur interpolée, ce qui peut ne pas toujours être vrai. Elle a tendance à produire des surfaces trop lisses et peut ne pas capturer efficacement des motifs spatiaux complexes.

1.3.1.2. Interpolation par Fonction de Base Radiale (RBF)

1. Principe

L'interpolation par fonction de base radiale (RBF) consiste à ajuster une fonction aux points de données observés et à utiliser cette fonction pour estimer les valeurs à de nouveaux emplacements (figure 1.3). La fonction, connue sous le nom de fonction de base radiale, prend typiquement la forme d'une somme pondérée de fonctions de base radiales centrées sur chaque point de données.

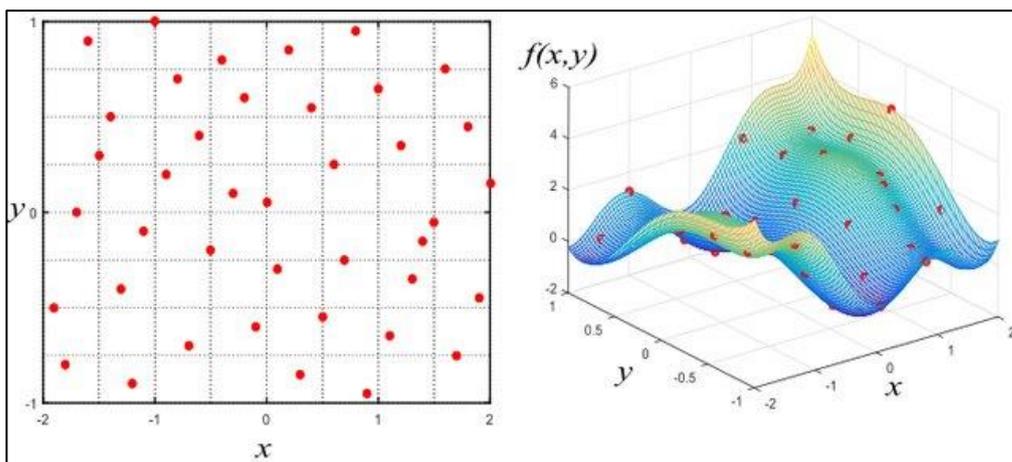


Figure I. 3 : Exemple d'interpolation RBF (Benaouali A. ; Kachel S., 2017)

L'interpolation par fonction de base radiale suit l'équation générale (Franke R., 1982).

$$Z(x) = \sum_{i=1}^n w_i \cdot \phi(\|x - x_i\|) \quad (I.2)$$

Où :

- $Z(x)$ est la valeur interpolée à l'emplacement x ,
- w_i sont les poids attribués à chaque point de données,
- $\phi(\|x-x_i\|)$ est la fonction de base radiale, qui dépend de la distance entre l'emplacement x et le point de données x_i .

2. Points forts

L'interpolation RBF peut capturer des tendances spatiales complexes et des changements brusques dans les données. Elle fournit des surfaces plus lisses par rapport à IDW et convient aux ensembles de données avec des points de données irrégulièrement espacés.

3. Limitation

L'interpolation RBF peut être gourmande en calculs, en particulier pour les grands ensembles de données. Elle peut également être sensible au choix des paramètres, tels que le nombre et le type de fonctions de base radiales utilisées.

I.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.

I.3.2.1 Semi-variogramme

Le semi-variogramme quantifie l'hypothèse selon laquelle les choses proches ont tendance à être plus similaires que les choses plus éloignées. Il mesure la force de la corrélation statistique en fonction de la distance, et il n'est pas biaisé par la moyenne.

Théoriquement, pour calculer le semi-variogramme, la formule I.3 est couramment utilisée :

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i + h) - Z(x_i)]^2 \quad (I.3)$$

Où : $\gamma(h)$ 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 (voir figure I.4).

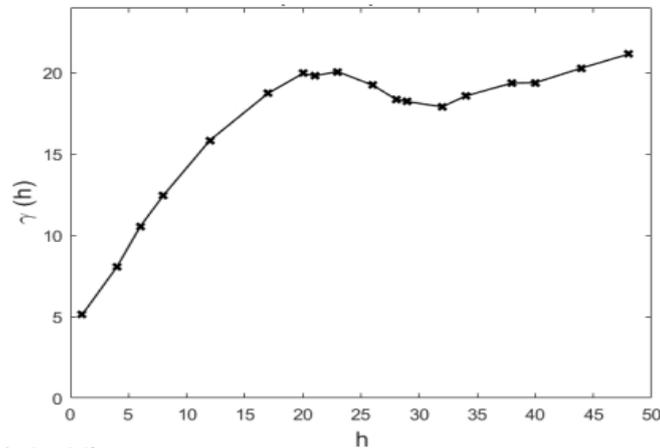


Figure I. 4 : Exemple de semi-variogramme.

I.3.2.2. Semi-Variogramme directionnel

On peut aussi calculer le variogramme selon certaines directions spécifiques ; pour cela le variogramme est définie par son pas de calcul « h » et sa direction déterminée par un angle (θ) (θ varie entre 0° et 360°) et son équation s'écrit :

$$\gamma(h, \theta) = \frac{1}{2m(h, \theta)} \sum_{i=1}^{(m, \theta)} [Z(x_i + h) - Z(x_i)]^2 \quad (I.4)$$

Où : $\gamma(h, \theta)$ est la valeur du semi-variogramme directionnel selon la direction θ pour la distance de décalage (h), m est le nombre total de paires de variables séparées par une distance de décalage h selon la direction θ , et $Z(x)$ est la valeur de la variable.

I.3.2.3 Propriétés d'un semi-variogramme

Pour interpréter la structure de variation spatiale des données et choisir le modèle de variogramme le plus approprié pour l'analyse géostatistique, il est essentiel de comprendre les propriétés d'un variogramme. Les principales propriétés d'un variogramme (figure1.5) comprennent:

- **Portée « R »** : Le variogramme atteint un plateau, appelé portée (**R**), au-delà duquel la variance entre les valeurs n'augmente plus avec la distance. La portée est une mesure de l'étendue de la corrélation spatiale dans les données.
- **Effet de pépité « C₀ »** : Le variogramme peut avoir une valeur minimale non nulle à une distance nulle, appelée: effet de pépité (**C₀**). L'effet de pépité représente la variabilité spatiale à une échelle plus petite que la taille de l'échantillon ou des erreurs de mesure.
- **Palier (C₀ + C = variance = C(0) = σ²)** : Le variogramme atteint son plateau, appelé le palier, à la portée. Le palier représente la variance totale des données une fois que la corrélation spatiale a été entièrement explorée. Le palier est décomposé en palier partiel « C » et l'effet de pépité « C₀ ».

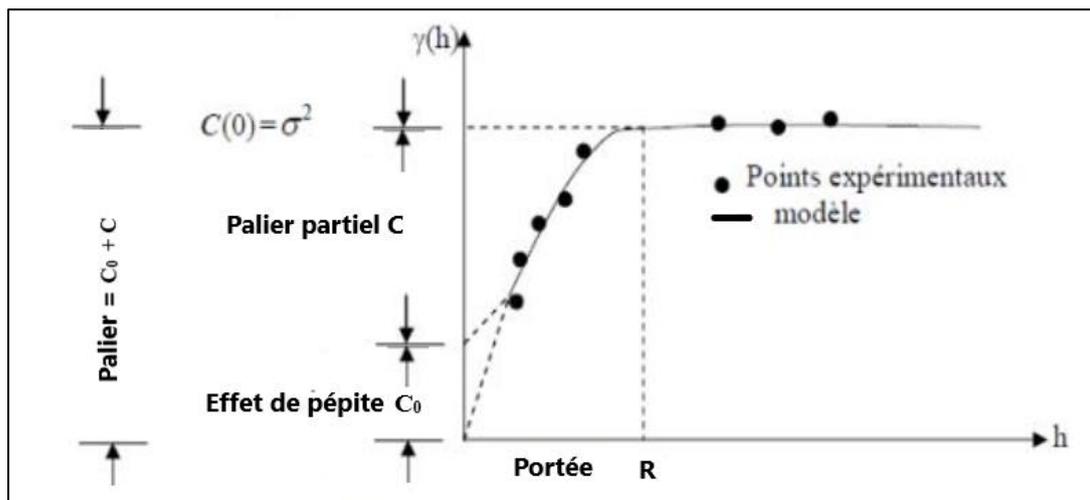


Figure I. 5 : Propriétés d'un variogramme.

I.3.2.4 Modèles de semi-variogramme

Le semi-variogramme empirique fournit des informations sur l'autocorrélation spatiale des ensembles de données. Cependant, il n'indique pas les directions et les distances possibles. Pour cette raison, et pour s'assurer que les prévisions de krigeage présentent des écarts de krigeage positifs, il est nécessaire d'ajuster le modèle (c'est-à-dire une fonction ou une courbe continue) au semi-variogramme empirique. Dans l'abstrait, cette étape est similaire à une analyse de régression dans laquelle une ligne continue ou une courbe est ajustée aux points de données.

Il existe différents modèles de semi-variogramme utilisés en géostatistique pour décrire la structure de variation spatiale des données. Parmi les plus couramment utilisés, on retrouve les modèles sphérique, circulaire, exponentiel, linéaire, gaussien, ainsi que d'autres variantes (voir figure I.6). Toutefois, il est important de noter que la plupart de ces modèles sont théoriques, ce qui signifie qu'ils sont basés sur des hypothèses simplifiées sur la corrélation spatiale des données. En conséquence, il existe une forte probabilité que ces modèles ne correspondent pas parfaitement aux données réelles observées sur le terrain.

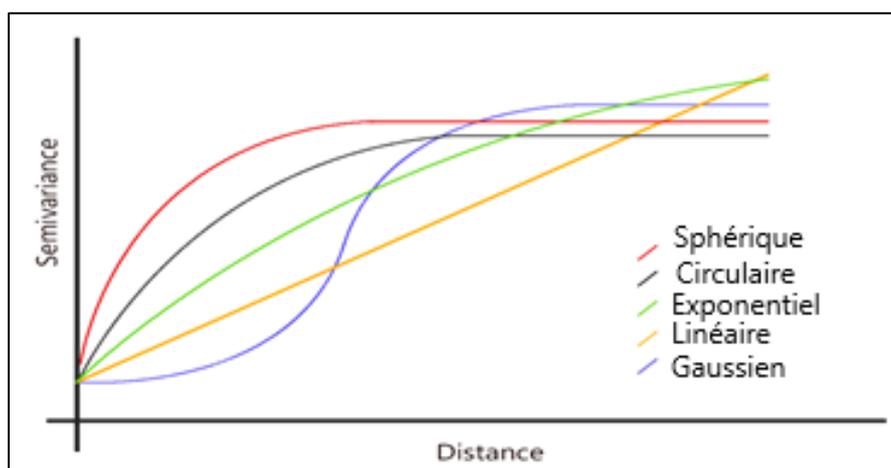


Figure I. 6 : Modèles d'ajustement aux semi-variogrammes

Nous présentons dans ce qui suit les plus utilisés en géostatistique :

1. Modèle Sphérique :

Le modèle sphérique est l'un des modèles de semi-variogramme les plus simples et les plus utilisés en géostatistique. Il suppose que la corrélation spatiale entre les données diminue progressivement avec la distance et atteint un plateau (plafond) au-delà d'une certaine distance appelée portée. Ce modèle est caractérisé par une transition brusque vers une constante au niveau de la portée, ce qui le rend adapté pour décrire des phénomènes spatiaux qui présentent une variabilité limitée à une certaine échelle. L'équation I.4 est appliquée pour le modèle sphérique (Floch J-M, 2018).

$$\gamma(h) = \begin{cases} C_0 & h = 0 \\ C_0 + C \left\{ \frac{3h}{2R} - \frac{1}{2} \left(\frac{h}{R} \right)^3 \right\} & 0 < h \leq R \\ C_0 + C & h > R \end{cases} \quad (\text{I.4})$$

Avec : $\gamma(h)$: variogramme théorique ; C_0 : l'effet de pépité ; C : palier partiel

$C_0 + C$ = palier = variance ; R : portée ; h : distance (pas de décalage)

2. Modèle Gaussien :

Le modèle gaussien est un autre modèle couramment utilisé pour modéliser la corrélation spatiale des données. Contrairement au modèle sphérique, il suppose une décroissance exponentielle de la corrélation avec la distance. Ce modèle est caractérisé par une transition plus douce vers le plateau (plafond) au niveau de la portée par rapport au modèle sphérique. Il convient aux phénomènes spatiaux qui présentent une variabilité plus étendue et des transitions plus douces entre les valeurs. L'équation I.5 est appliquée pour le modèle exponentiel (Floch J-M, 2018).

$$\gamma(h) = \begin{cases} C_0 & h = 0 \\ C_0 + C \left\{ 1 - \exp \left\{ - \left(\frac{h}{R} \right)^2 \right\} \right\} & h \neq 0 \end{cases} \quad (\text{I.5})$$

Avec : $\gamma(h)$: variogramme théorique ; C_0 : l'effet de pépité ; C : palier partiel

$C_0 + C$: palier= variance ; R : portée ; h : distance (pas de décalage)

3. Modèle Exponentiel :

Le modèle exponentiel il suppose une décroissance exponentielle de la corrélation spatiale avec la distance, au même temps il a une rapidité de décroissance. Cela signifie que la corrélation diminue plus rapidement avec la distance, ce qui convient aux phénomènes spatiaux présentant une forte décroissance de la corrélation avec la distance. L'équation I.6 est appliquée pour le modèle gaussien (Floch J-M, 2018).

$$\gamma(h) = \begin{cases} C_0 & h = 0 \\ C_0 + C \left\{ 1 - \exp\left\{-\frac{h}{R}\right\}\right\} & h \neq 0 \end{cases} \quad (I.6)$$

Avec : $\gamma(h)$: variogramme théorique ; C_0 : l'effet de pépite ; C : palier partiel

$C_0 + C$: palier = variance ; R : portée ; h : distance (pas de décalage)

Une fois un modèle théorique est ajusté au variogramme empirique. Les paramètres nécessaires pour effectuer le krigeage sont obtenus. En d'autres termes, le variogramme décrit la structure de la corrélation spatiale des données, tandis que le krigeage utilise cette information pour estimer les valeurs inconnues à des emplacements non échantillonnés de manière optimale, en tenant compte de cette structure de corrélation.

I.3.2.5 Krigeage

Le krigeage est une méthode d'interpolation géostatistique qui estime la valeur à un emplacement non mesuré en incorporant à la fois la structure de corrélation spatiale des données et un modèle de variogramme. Les variogrammes décrivent comment la corrélation spatiale entre les points de données change avec la distance et la direction.

Le krigeage produit des prédictions précises et fournit des mesures quantifiables de l'incertitude. Il peut gérer efficacement les données non stationnaires et irrégulièrement espacées. Cependant, les hypothèses de krigeage, telles que la stationnarité de la structure de corrélation spatiale, peuvent ne pas toujours être vraies dans la pratique. La précision des prédictions de krigeage dépend fortement de la disponibilité et de la qualité des données d'entrée et de la pertinence du modèle de variogramme choisi.

L'équation générale pour le krigeage est donnée par l'équation I.7 (Cressie N., 1993).

$$Z(x) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z_i + \varepsilon(x) \quad (I.7)$$

Où :

- $Z(x)$ est la valeur interpolée à l'emplacement x .
- Z_i sont les valeurs connues aux emplacements x_i .
- λ_i sont les coefficients de pondération déterminés par la méthode de krigeage,
- $\varepsilon(x)$ est le terme d'erreur aléatoire.

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:

Le krigeage simple suppose que la moyenne du processus spatial modélisé est connue et constante dans la zone d'étude. Il convient lorsque la moyenne est connue et stationnaire.

La méthode estime la structure de corrélation spatiale à l'aide d'un modèle de variogramme et calcule les poids des points de données voisins en fonction de leurs relations spatiales.

Ces poids sont utilisés pour générer des prédictions à des emplacements non mesurés, en supposant que la moyenne du processus reste constante dans toute la zone d'étude (Cressie N., 1993). Le krigeage simple est effectué selon l'équation I. 8:

$$Z_0 = \sum \lambda_i Z_i + \left(1 - \sum \lambda_i\right) m \quad (\text{I.8})$$

Où : Z_0 est la valeur à estimer au point X_0 ,

Z_i sont les valeurs observés aux points X_i

λ_i sont les poids des points observés

m : moyenne connue du champ à estimer

B. Krigeage ordinaire:

Le krigeage ordinaire estime la structure de corrélation moyenne et spatiale simultanément à partir des données observées, et il inclut un terme supplémentaire, le résidu de krigeage, pour tenir compte de l'erreur d'estimation. Il est approprié lorsque la moyenne n'est pas connue ou varie spatialement, et il fournit des prédictions non biaisées avec une variance minimale sous l'hypothèse de la stationnarité dans la structure de corrélation spatiale. (Cressie, 1993).

Le krigeage ordinaire consiste à chercher le vecteur des coefficients, $i=1, \dots, n$ pour l'estimateur optimal où la variable spatiale Z_0^* au point X_0 est estimée par la somme pondérée des autres valeurs échantillonnées Z_i situées aux points X_i (voir l'équation I. 9.)

$$Z_0^* = \sum \lambda_i Z_i \quad (\text{I.9})$$

C. Krigeage universel:

Le krigeage universel étend encore les capacités du krigeage ordinaire en incorporant des covariables ou des termes de tendance supplémentaires dans le modèle. Ces covariables peuvent représenter des tendances systématiques ou des moyennes variant spatialement dans les données. Le krigeage universel permet une plus grande flexibilité dans la modélisation des tendances spatiales complexes et de la non-stationnarité de la fonction moyenne. En incluant des covariables, le krigeage universel peut améliorer la précision de la prédiction et réduire l'incertitude par rapport au krigeage ordinaire, en particulier lorsque la fonction moyenne présente une variabilité spatiale. (Cressie N., 1993). Le krigeage universel est effectué selon l'équation I. 10.

$$Z(s) = \mu(s) + \tau(s) \quad (\text{I.10})$$

Où : $\mu(s)$ est une fonction déterministe.

1.4 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 :

1.4.1 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.

1.4.2 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.

1.4.3 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.

1.4.3.1 Validation

Lors de la validation, une partie des données (l'ensemble de données de test) est séparée du reste (l'ensemble de données d'apprentissage) pour développer des modèles de tendance et d'auto-corrélation pour la prédiction.

Les méthodes de comparaison, telles que les graphiques et les statistiques sommaires, utilisées pour évaluer les prédictions par rapport aux valeurs vraies sont similaires pour la validation et la validation croisée. Cependant, la validation n'évalue qu'un sous-ensemble des données et n'évalue pas directement le modèle final, qui devrait utiliser toutes les données disponibles. Au lieu de cela, la validation vérifie la validité des protocoles de décision, comme le choix du modèle de semi-variogramme et la sélection du voisinage de recherche, en s'assurant qu'ils fonctionnent efficacement pour l'ensemble de données entier s'ils sont validés.

I.4.3.2 Validation croisée

La validation croisée implique l'utilisation de l'ensemble des données pour estimer les modèles de tendance et d'autocorrélation. Il exclut systématiquement chaque point de données un par un, prédisant sa valeur en fonction des données restantes.

Par exemple, le diagramme ci-dessous (figure I.7) montre 10 points de données. La validation croisée omet un point (point rouge) et calcule la valeur à cet emplacement en utilisant les 9 points restants (points bleus). Les valeurs prédites et réelles à l'emplacement du point omis sont comparées pour évaluer leur cohérence les unes avec les autres. Ce processus est répété pour chaque point (<https://pro.arcgis.com/en/pro-app/.../cross-validation.htm>)

Les estimateurs d'erreurs dans la validation croisée sont calculés sur la base des équations suivantes (<https://pro.arcgis.com/fr/pro-app/latest/tool-reference/geostatistical-analyst/cross-validation.htm>):

- Moyenne des erreurs : Il diffère moyennée entre les valeurs mesurées et prédites. (voir l'équation I. 11.)

$$\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{z}(s_i) - z(s_i))}{n} \quad (\text{I.11})$$

- Erreur quadratique moyenne : Il indique la pertinence de prédiction des valeurs mesurées par votre modèle. Il est préférable que cette erreur soit la plus petite possible. (voir l'équation I. 12.)

$$\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{z}(s_i) - z(s_i))^2}{n}} \quad (\text{I.12})$$

- Erreur standardisée moyenne : Cette valeur doit être proche de 0 (voir l'équation I.13).

$$\frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\hat{z}(s_i) - z(s_i)}{\hat{\sigma}(s_i)} \right)}{n} \quad (\text{I.13})$$

- Erreur quadratique moyenne standardisée : cette valeur doit être proche de 1 si les erreurs standard de prédiction sont valides. Si l'erreur quadratique moyenne standardisée est supérieure à 1, vous sous-estimez la variabilité dans vos prédictions. Si l'erreur quadratique moyenne standardisée est inférieure à 1, vous surestimez la variabilité dans vos prédictions (voir l'équation I. 14).

$$\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\hat{z}(s_i) - z(s_i)}{\hat{\sigma}(s_i)} \right)^2}{n}} \quad (\text{I.14})$$

Bien que la validation croisée exploite l'ensemble des données pour estimer les modèles, elle peut identifier certains points de données avec des erreurs significatives, nécessitant une réévaluation et un ajustement des modèles de tendance et d'autocorrélation.

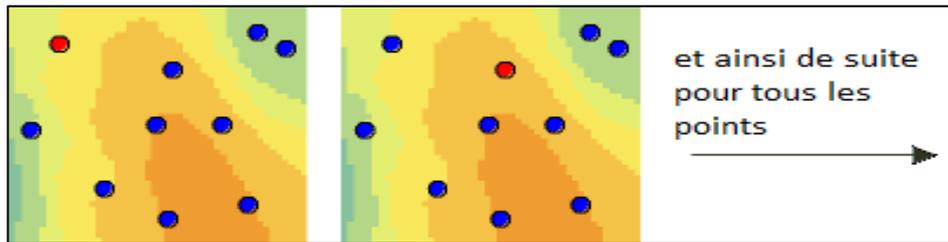


Figure I. 7 : Processus de la validation croisée
(<https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/tool-reference/geostatistical-analyst/cross-validation.htm>)

1.5 Conclusion

Bien que nous ayons présenté dans ce chapitre que quelques méthodes d'interpolation comme, la méthode IDW, RBF et le krigeage, il y a bien plus de méthodes d'interpolation spatiale.

Cependant, Il n'existe pas de méthode unique d'interpolation applicable à toutes les situations. Certaines méthodes sont plus précises et utiles que d'autres, mais elles peuvent nécessiter un temps de calcul important. Chaque méthode présente des avantages et des inconvénients. En pratique, le choix d'une méthode d'interpolation spécifique devrait dépendre des données d'échantillon, du type de surfaces à générer et de la tolérance aux erreurs d'estimation. (<https://docs.qgis.org/>).

Chapitre II

Contexte géologique et hydrogéologique

de la zone d'étude

II.1 Introduction

Avant d'entreprendre une étude sur un aquifère, il est essentiel d'analyser sa morphologie en déterminant ses limites, sa superficie, son périmètre, la répartition des altitudes, les talwegs et d'autres paramètres caractéristiques.

La présente étude porte sur la cartographie de la piézométrie des eaux souterraines de la plaine de Ghriss dans la wilaya de Mascara. Ce chapitre vise à exposer le contexte géologique et hydrogéologique des aquifères de cette région.

En effet, la connaissance du contexte géologique et hydrogéologique des aquifères de la région est indispensable pour modéliser la piézométrie et interpréter les résultats.

II.2 Situation géographique

La plaine de Ghriss fait partie du bassin versant de l'oued Fekan. Elle fait partie du bassin hydrologique de la Macta. Elle s'étend sur une superficie de 1180.8 km², un périmètre de 496.61 km. La plaine de Ghriss est située au Nord-Ouest Algérien, entre 35°07' et 35°31' de latitude Nord et entre 0°0' et 0°26' de longitude Est. Administrativement la région dépend de la Wilaya de Mascara (Figure II.1).

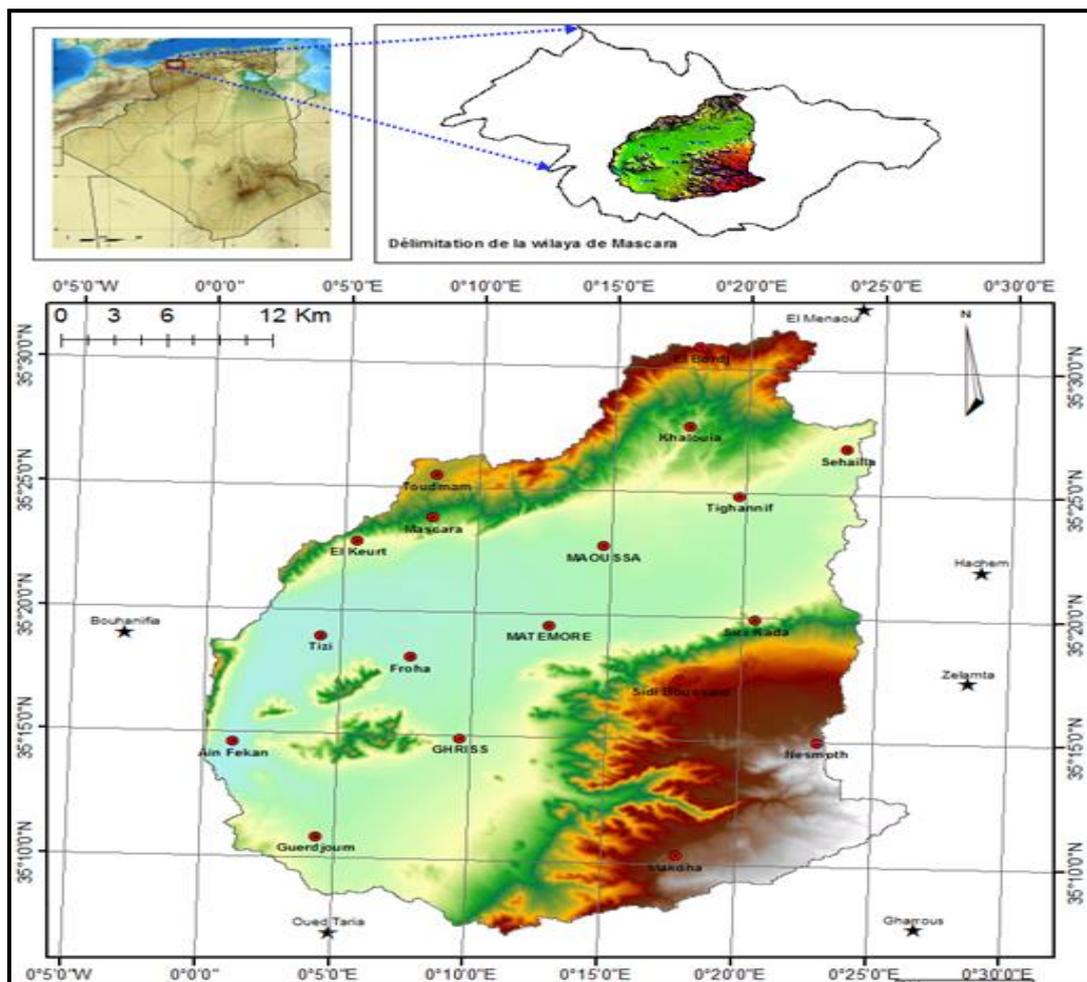


Figure II. 1 : Situation géographique de la zone d'étude (Bouabssa N. ,2017)

La plaine est une étendue plate de 460m d'altitude moyenne, surplombée par des reliefs de bordure élevés jusqu'à 1178 m d'altitude au Sud (montagne de Nesmoth).

Cette plaine était occupée par des marécages qui persistent encore de nos jours dans la région de Maoussa (marais de Sidi Lahssen) et du nord de Tizi. Elle est limitée au Nord par les monts 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 Tighenifine.

II.3 Géologie de la région

La plaine est une cuvette d'effondrement à topographie plane, encadrée de reliefs aux aspects géologiques divers (Benadela L., Bekkoussa B., 2017) (Figure II.2)

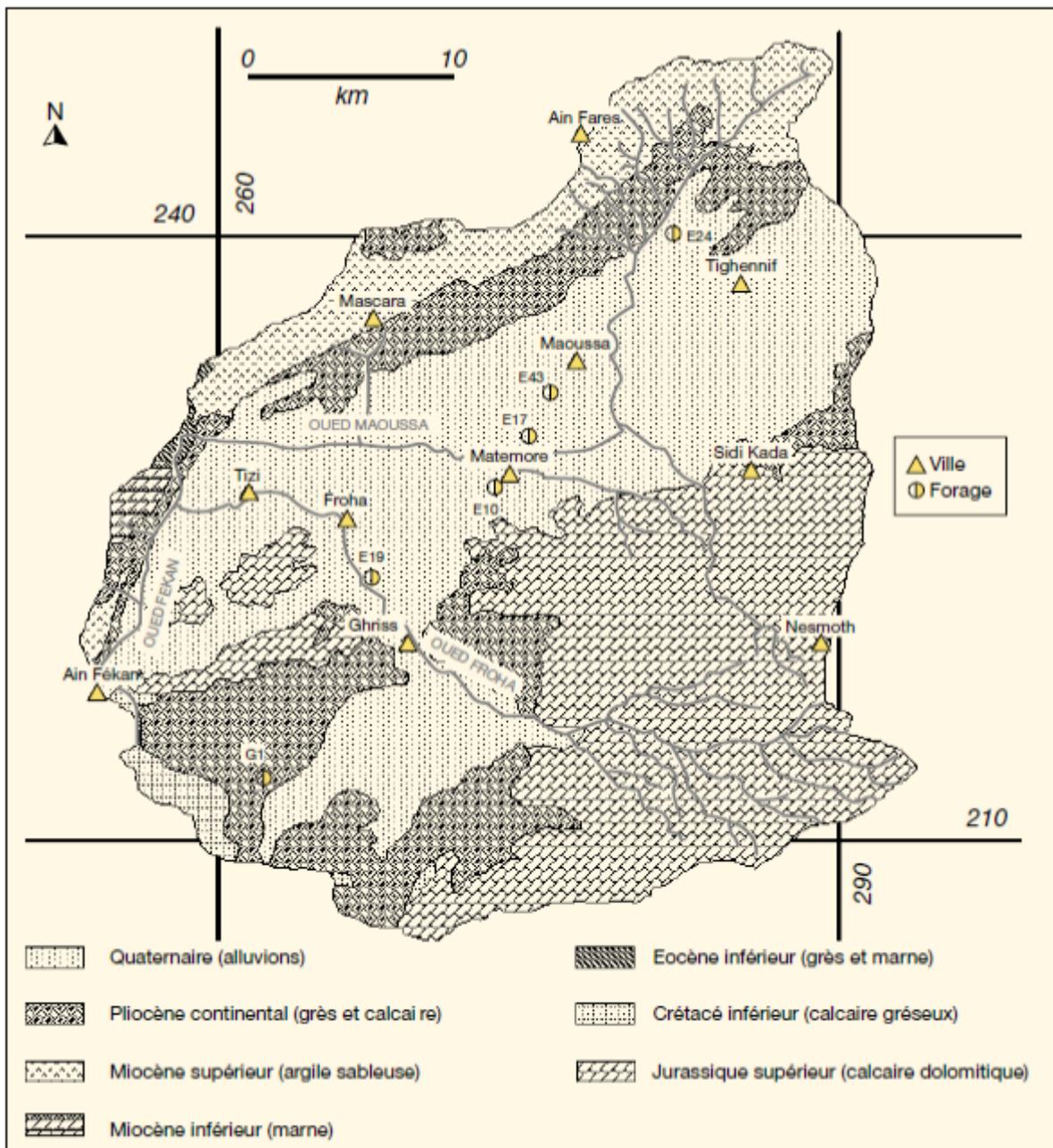


Figure II. 2 : Carte géologique de la plaine de Ghriss (Bekkoussa et al. 2008).

Bordure Nord et Ouest

Les Monts des Beni-Chougrane sont allongés en arc de cercle en direction Sud Sud-Ouest et Nord-Nord Est, très plissés, à ossature Crétacé et recouvrement Tertiaire très épais. Ce sont les vestiges de l'ancien sillon méditerranéen, effondrés et transportés par charriage en deux ensembles principaux ; le Crétacé moyen et supérieur et le Nummulitique (Eocène et Oligocène) (Benadela L., Bekkoussa B. 2017).

Bordure Sud

Les Monts de Saida constituent la bordure Sud de la plaine. Ils ont subi une intense tectonique cassante ; ces ensembles s'enfoncent légèrement vers le Nord, ce qui favorise l'écoulement et le drainage des eaux vers la plaine. A Ain Fekan cet ensemble calcaréo dolomitique du Jurassique Supérieur est limité par une faille qui le met en contact avec le Crétacé inférieur argilo-gréseux. Cette interruption soudaine de la perméabilité des terrains est à l'origine des sources des Aïoune Fékan, où le Crétacé constitue un véritable barrage souterrain. Des dépôts de destruction, sables argileux rouges et conglomérats, se sont amassés au pied des Monts de Sidi Kadda sur de grandes épaisseurs par endroits (Benadela L., Bekkoussa B. 2017).

Bordure Est

A L'Est de Tighenif, les affleurements de marnes et d'argiles de L'Oligocène et du Miocène forment une barrière imperméable qui limite nettement les bassins versants de la plaine de Ghriiss et de l'Oued Mina. La surface topographique confirme cette séparation (Benadela L., Bekkoussa B. 2017).

Centre de la plaine

La cuvette correspond à une zone de subsidence marquée par la flexure des couches du Néogène, en bordure des Monts des Beni-Chougrane ; les apports d'alluvionnement argilosableux de L'Oued Maoussa continuent de permettre à cette subsidence d'évoluer. Le substratum, effondré, est constitué par les calcaires dolomitiques du Jurassique Supérieur. Au-dessus, se sont déposés localement des conglomérats de base puis un remplissage marin d'argile et marne grisâtre et verdâtre du Miocène inférieur et moyen. Au centre de la plaine, la subsidence a permis l'accumulation d'une grande épaisseur de calcaire Lacustres (Sourisseau, 1972).

II.4 Situation géomorphologique

La morphologie présente différents aspects:

Au Nord et à l'Ouest des pieds montagneux formants de bas reliefs.

Au centre, des témoins d'un autre environnement et des monticules rocheux assez élevés.

Au Sud, d'importants massifs d'aspect tabulaire et coiffés de sommets dépassant 1000 mètres (montagnes de Nesmoth).

A l'Est, un relèvement du sol forme le col de Tamazougha entre Tighennif et la vallée d'Oued Haddad. (GASMI, BEN HAMI, 2015)

II.5 Etude Climatique

Les conditions climatiques plus que d'autres facteurs jouent un rôle essentiel dans l'alimentation des eaux souterraines.

Les températures atmosphériques ont une grande influence sur le régime d'écoulement ou l'évaporation favorise ainsi le déficit.

II.5.1 La pluviométrie

Depuis une vingtaine d'années on remarque une diminution constante des précipitations. Alors que la moyenne au début des années 1980 était de 400 à 500 mm/an, la moyenne pour les dernières années est de seulement 300 à 400 mm/an et l'année 2000 et 2002 aura été la campagne la plus sèche des vingt dernières années : 200 mm. En effet, les précipitations qui sont de loin les plus importantes agissent directement sur la recharge et le renouvellement des eaux de la plaine de Ghriss.

II.5.1.1 Les pluies mensuelles

Les précipitations agissent directement sur la recharge de la nappe, surtout sur la nappe superficielle. Dans la plaine de Ghriss la répartition des pluies est irrégulière est insuffisante pour le développement des cultures céréalières, elle est de l'ordre de 440 mm/an (moyen inter-annuelle des 03 stations). La figure II.3 montre que le maximum des précipitations est atteint pendant la période qui s'étend entre le mois d'Octobre et le mois de Mai. Tandis que les valeurs minimales des précipitations sont enregistrées durant la période qui s'étend entre Juin et Septembre. Ce qui donne naissance a deux saisons distinctes : une saison sèche et une saison humide

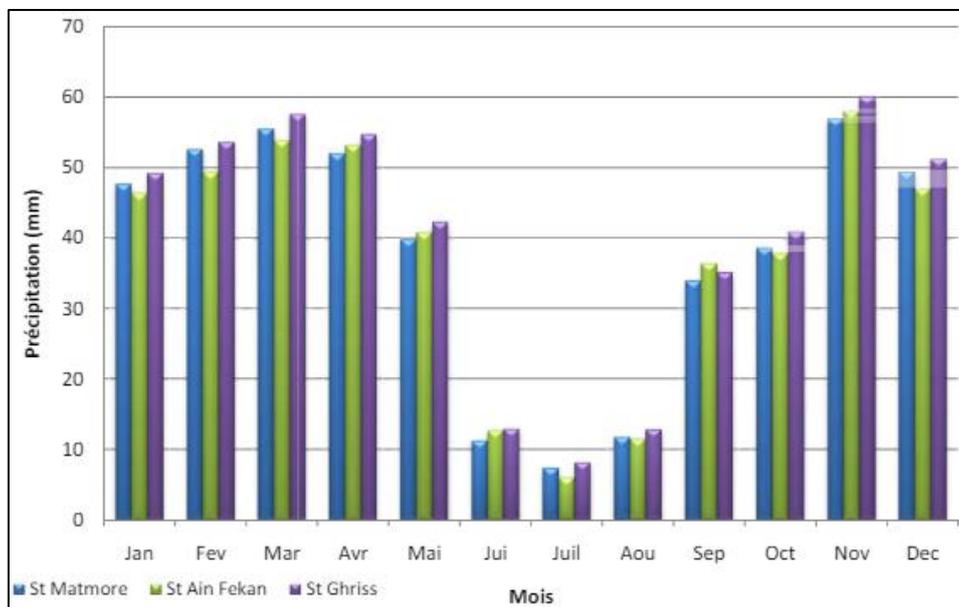


Figure II. 3 : Précipitations mensuelles moyennes interannuelles, pour les 3 stations : Matmore, Ghriss et Ain fekan du (1979 à 2016) en mm (Bouabssa N., 2017 ; Belabdi S, et al., 2022)

II.5.1.2 Les précipitations annuelles

L'analyse des séries de pluies annuelles des trois postes pluviométriques entre 1979 et 2016 (voir Figure II.4). Les années les plus sèches sont : 1998, 2000, 2002, 2005 et 2015, les années les plus humides sont : 1979, 1980, 1986, 1989, 1996, 1997 et 2004.

D'après les graphes des précipitations pour les trois stations (Matemore, Ghriss et Ain fekan) en remarque que la quantité diminue au fur à la mesure de l'année 1979 au 2016, puis une augmentation légère jusque 2016 du fait que la majorité des terres agricoles dans le bassin versant de Ghriss non reboisé.

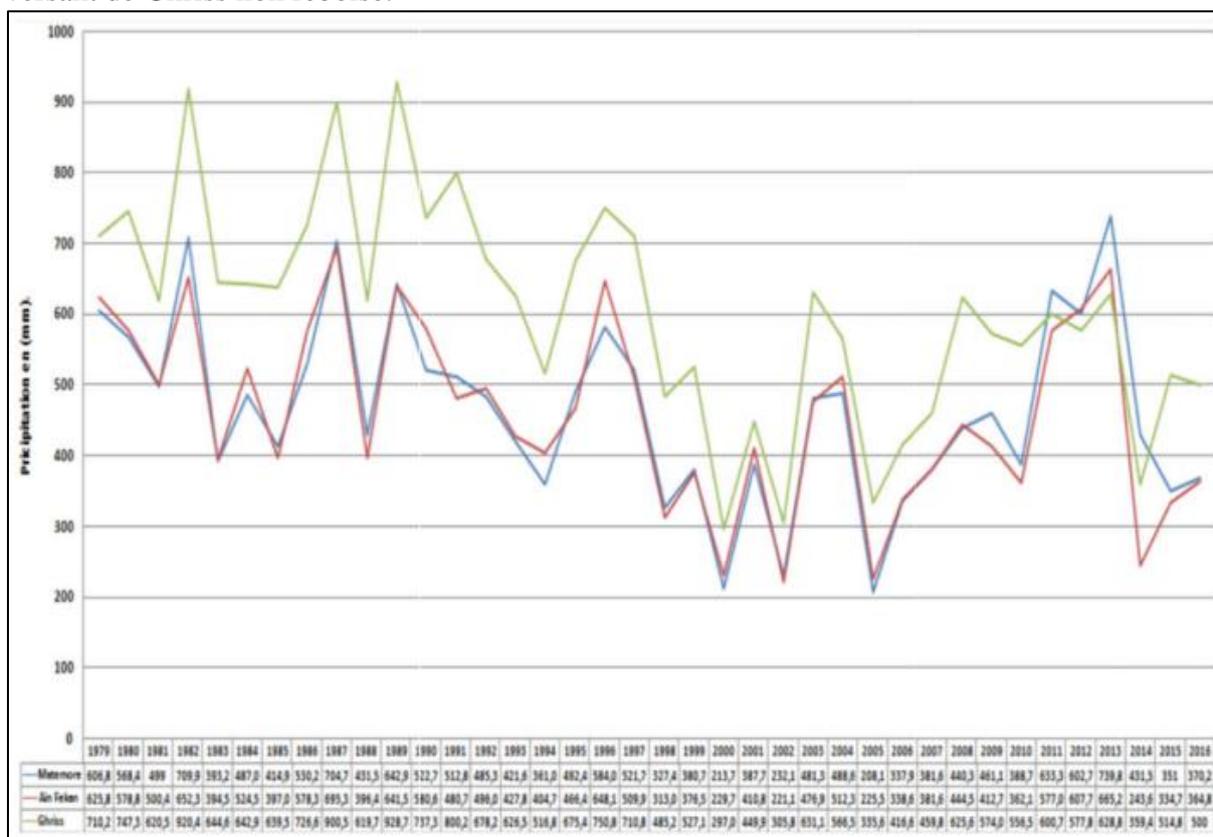


Figure II. 4 : les précipitations interannuelles au niveau de trois stations climatique dans le plain de Ghriss entre 1979 au 2016 (Bouabssa N., 2017 ; Belabdi S, et al., 2022)

II.6 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.5) :

- 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 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).

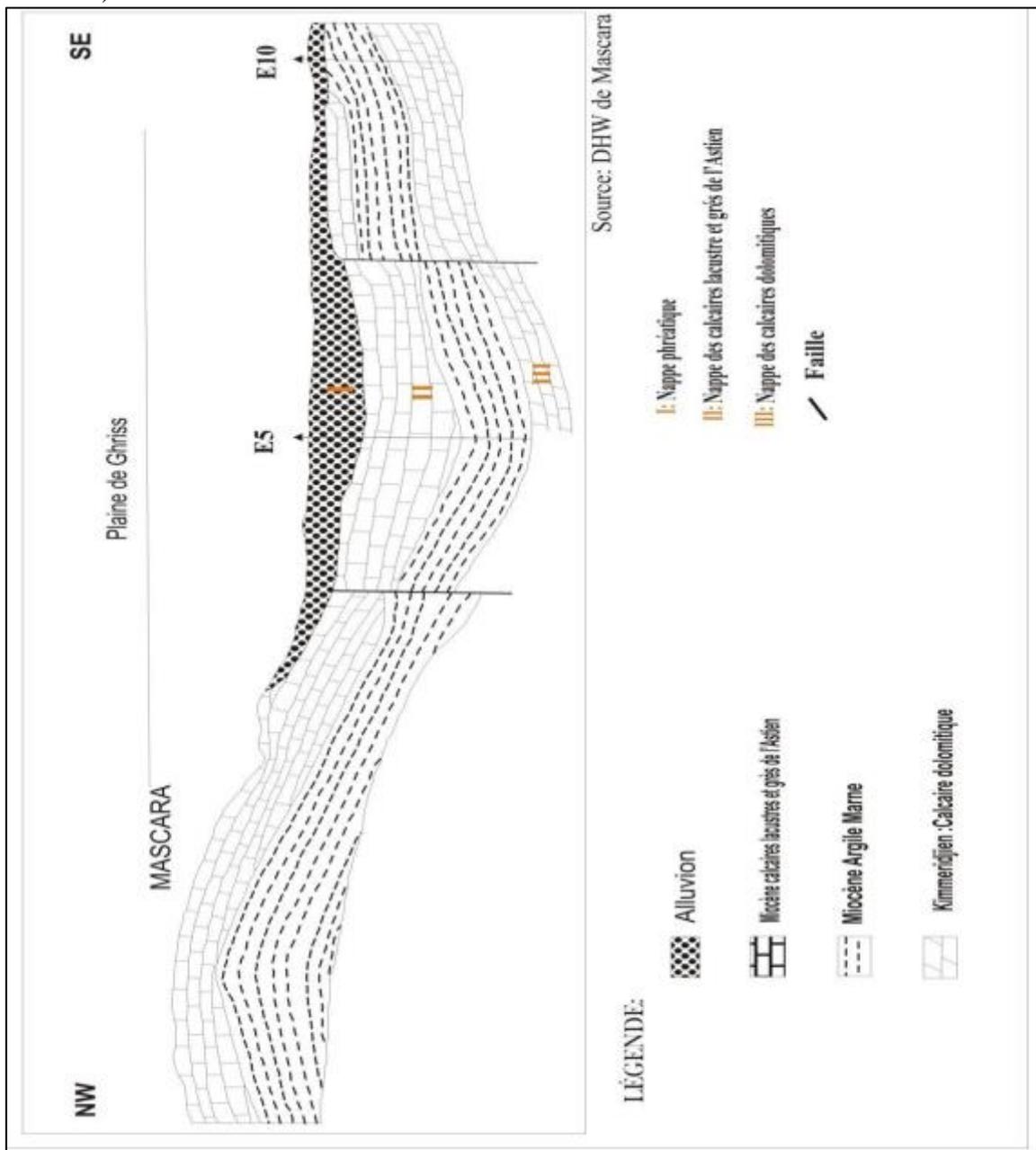


Figure II. 5 : Coupe géologique et hydrogéologique de la plaine de Ghriss (ANRH, 2012 ; Lakhdari T., 2013)

II.7. Fonctionnement du système aquifère de la plaine de Ghriss

II.7.1. Nappe superficielle

Cette nappe s'étend presque sur la totalité de la plaine avec une superficie de 650 m². Elle est uniforme et continue dans toute la partie abaissée et remblayée de la plaine. Hétérogène et discontinue sur les reliefs des bordures, elle est renfermée dans les dépôts alluvionnaires et dans les terrains d'altération des roches sous-jacentes.

L'aquifère est constitué par des sables, des grés, des calcaires blancs altérés, poreux et fissurés, des sables de désagrégation, des argiles sableuses et détritiques. Ce qui entraîne des variations locales des paramètres hydrauliques. La nappe est limitée géologiquement par l'interruption de l'aquifère sur les bordures. (B.Sourisseau, 1972).

Cette nappe superficielle est alimentée par l'infiltration des eaux de pluies, dont on a vu qu'elle était importante. Le taux d'infiltration efficace est estimé à environ 20% des précipitations sur la plaine. A cela viennent s'ajouter les retours à la nappe sur les zones irriguées évaluées en première approximation à 10% des débits prélevés pour l'agriculture. La nappe reçoit par ailleurs une partie des eaux de crue et la totalité des débits de base des oueds Moussa et Froha, qui se perdent entre l'entrée de ces oueds dans la plaine et l'exutoire de l'oued Fekan, de plus de nombreux thalwegs récoltent le ruissellement sur les monts Beni Chougrane et les montagnes de Saida, et viennent aboutir aux bordures de la nappe phréatique, apportant un débit d'alimentation parfois important. L'exutoire naturel de la nappe phréatique est constitué en majorité par les sources d'Ain Fekan. Une partie du débit souterrain poursuit son écoulement en profondeur à l'aval du bassin.

II.7.2. Nappe des calcaires lacustres, sables et grés du Pliocène

Cette nappe est libre dans les monts Beni Chougrane, captive sous la plaine et localisée à la moitié occidentale de la plaine sur une superficie de "125,1 Km² " l'aquifère est constitué par une formation hétérogène de grande extension. L'artésianisme de la nappe est favorisé par la différence de perméabilité, diminution vers Ain Fekan, Tizi. En profondeur, cette nappe s'individualise de la nappe superficielle par la variation verticale de la perméabilité, il y aurait donc une mise en charge importante.

Cette nappe est alimentée par les affleurements de Beni Chougrane où l'on estime le taux d'infiltration efficace à 12 % des précipitations. Dans la plaine les calcaires lacustres se trouvent à une charge supérieure à la fois à la nappe phréatique et aux dolomies du Jurassique.

A l'Est les grés de Tighennif sont également mis en charge dès que l'on atteint la plaine. Le principal exutoire naturel de cet aquifère est donc constitué par la nappe phréatique vers laquelle les eaux du Pliocène percolent à travers leur toit marneux. Une percolation en profondeur vers le Jurassique est peu probable et en tous cas de faible importance en raison de l'épaisse formation de marnes vertes qui sépare les deux couches.

L'oued Moussa constitue également un exutoire pour la partie libre de Tighennif dont le drainage constitue le débit de base de l'oued.

II.7.3. Nappe des calcaires et dolomies du Jurassique supérieur

Cette nappe est localisée dans la partie supérieure des calcaires dolomitiques qui sont fissurés et Karstiques, son impluvium est vaste. Il occupe toute la partie Sud de la plaine. Le cheminement des cours d'eau s'effectue au niveau des fissures Karstiques.

Le toit est constitué par une épaisse formation de marnes vertes au Nord (entre 100 et 500m) passant vers le Sud-Est et l'Ouest des argiles rouges moins épaisses (20 à 25 m).

La nappe du Jurassique est exploitée par de nombreux forages. Destinés aussi bien à l'alimentation, elle est limitée hydro géologiquement par une ligne de partage des eaux souterraines au Sud et Sud - Est. Le compartiment occidental, ou aval est alimenté par les affleurements des Djebels Enfouss et Bou Ghaddou. L'aquifère est caractérisé par une perméabilité en grande importance, mise en évidence en deux points et communique directement avec la nappe phréatique sur une grande superficie: Ain Fekan constitue l'exutoire naturel de la nappe.

II.8 Carte piézométrique

La surface piézométrique est définie par l'ensemble des courbes d'égale niveau piézométrique qui correspondent à des lignes équipotentiels.

La carte piézométrique de la plaine de Ghriss de la période des basses eaux en Mai 2009 (voir Figure II.6) indique un écoulement général vers le Sud-Ouest. La profondeur de la surface piézométrique varie de 370 à 570m.

La nappe superficielle est alimentée à l'Est par les plateaux de Teghennif où une partie de débit souterrain poursuit son écoulement pour alimenter oued Maoussa, toutefois au sud-ouest à Ain Fkan les lignes de courant convergent vers Ain Fkan et alimentent ces sources. Plus au nord, Ain Fares constitue un exutoire des eaux souterraines de la plaine ainsi que les monts de Beni Chougrane au sud-ouest. Au nord de Tizi le gradient hydraulique devient fort et les lignes de courant tracent une zone d'alimentation dans cette partie.

À l'Est au sud de Sidi Kada une autre zone d'alimentation s'étend avec un gradient hydraulique fort où ces eaux sont drainées par l'oued de MOUSSA, et une partie s'écoule vers le sud, vers Nesmoth.

Au centre de la plaine, à Matmore et Maoussa, les lignes de courant convergent et le gradient hydraulique devient relativement faible, indiquant une zone d'exploitation (pompage).

(GASMI A, BEN HAMI A., 2015)

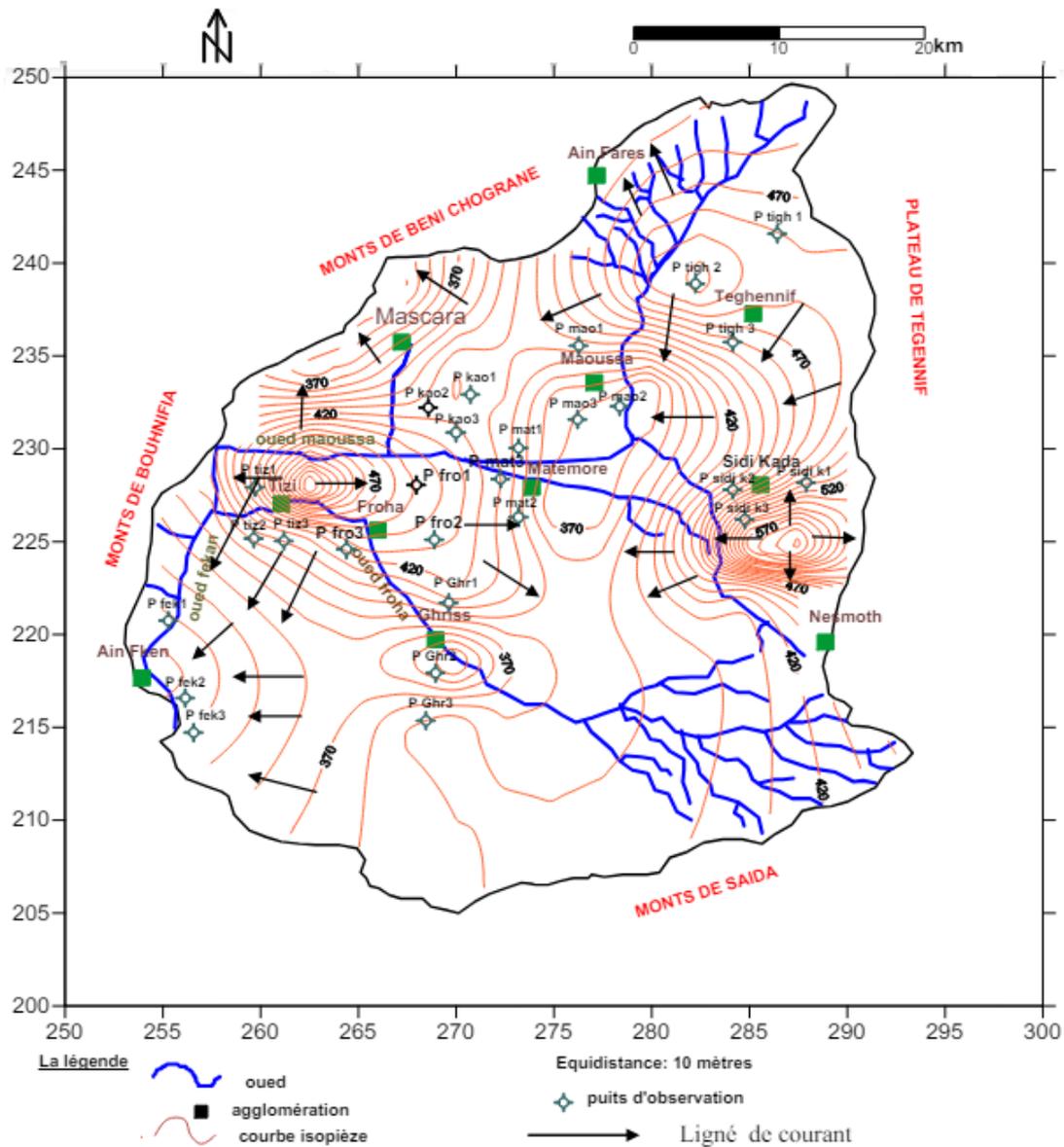


Figure II. 6 : Carte piézométrique de la plaine de Ghriss [basses eaux, 2009]. (GASMI A, BEN HAMI A. 2015)

II.9 Conclusion

La Plaine de Ghriss se distingue par sa topographie plate, façonnée par des dépôts sédimentaires alluvionnaires argilo-sableux. Enclavée entre des reliefs formés par diverses formations géologiques, cette plaine occupe une position centrale au sein du bassin hydrologique de la Macta, englobant l'intégralité du sous-bassin de l'oued Fekan.

La Plaine de Ghriss, nichée entre des reliefs montagneux, se distingue par ses caractéristiques hydrogéologiques uniques. Elle abrite des ressources en eau souterraine précieuses qui alimentent l'agriculture et la vie quotidienne des habitants.

L'importance de la Plaine de Ghriss en tant que région agricole productive est donc indéniable, avec ses terres fertiles et son climat favorable.

Chapitre III

Comparaison des méthodes déterministes

& géostatistiques

III.1 Introduction

Les applications des méthodes d'interpolation sont très variées et ceci dans différents domaines. L'évaluation des techniques d'interpolation spatiale dans le domaine de l'hydrogéologie, pour la cartographie de la piézométrie du système aquifère de la plaine de Ghriss, est menée dans cette étude. Elle est effectuée à l'aide de l'extension Geostatistical Analyst d'ArcGIS.

En effet, en hydrogéologie les données disponibles sont souvent des mesures directes obtenues in situ à partir de sondages, ou des données indirectes de type géophysique, qui n'informent pas directement sur les propriétés des aquifères mais présentent certaines corrélations avec celles-ci (Gomez et Garcia, 1998). Le choix d'une technique d'interpolation appropriée dépend de nombreux facteurs et nécessite une expérience et une expertise considérables (Martin et al., 1989; Rogers, 2003).

Ce chapitre vise à tester trois méthodes d'interpolation afin de déterminer laquelle permet d'obtenir une cartographie piézométrique fiable et représentative du système aquifère phréatique de la plaine de Ghriss.

III.2 Collecte des données

Les données relatives à la piézométrie des eaux souterraines utilisées dans cette étude ont été recueillies auprès de l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (A.N.R.H) de la wilaya d'Oran. Ces données correspondent aux niveaux piézométriques de 40 puits répartis sur la nappe supérieure de la plaine de Ghriss durant les périodes basses eaux de l'année 2017/2018.

Le tableau III.1 montre la piézométrie relative à ces points d'eau.

Tableau III. 1 : Données piézométriques des basses eaux de la nappe supérieure de la plaine de Ghriss, année 2017/2018 (Source: ANRH Oran/ 2024)

Nom du puits	X (m)	Y (m)	ALT (m)	Profondeur (m)	BE Oct-17	Niveau Piezo-métrique (BE)
N°01	260825	229625	456.000	33.30	21.83	434.170
N°02	256550	224150	466.325	///	43.84	422.485
N°03	259900	225650	453.942	///	46.54	407.402
N°04	262150	225200	461.470	54.00	53.35	408.120
N°05	262550	229150	465.899	49.80	44.95	420.949
N°06	263800	230450	459.767	53.18	41.85	417.917
N°07	269000	228050	466.220	50.35	SEC	415.870
N°08	270775	234000	479.673	47.58	30.40	449.273
N°09	274950	229950	476.938	78.35	64.00	412.938
N°10	271525	224100	481.535	66.00	63.97	417.565
N°11	269025	224200	474.149	///	78.08	396.069
N°12	266450	228300	461.576	48.35	55.05	406.526
N°13	266350	227000	462.950	48.15	SEC	414.800
N°14	259950	228700	451.110	50.66	30.00	421.110
N°15	282400	238600	532.984	24.60	27.53	505.454
N°16	290250	238275	505.000	25.70	4.75	500.250
N°17	284750	236650	498.662	30.89	30.55	468.112

N°18	286600	235500	492.481	46.70	28.43	464.051
N°19	286600	233400	492.703	30.80	31.35	461.353
N°20	282900	231100	492.303	34.07	29.18	463.123
N°21	289350	236025	486.770	13.18	6.35	480.420
N°22	279500	232800	494.700	59.50	39.07	455.630
N°23	288200	239640	514.925	23.50	10.23	504.695
N°24	277800	232100	486.500	78.60	59.98	426.520
N°25	279200	234150	498.000	61.70	59.38	438.620
N°26	279175	227450	497.937	///	56.95	440.987
N°27	271500	212900	550.000	43.50	SEC	506.500
N°28	271000	211350	555.760	32.00	18.59	537.170
N°29	271700	209250	602.220	24.50	19.20	583.020
N°30	265600	214750	504.110	45.55	43.25	460.860
N°31	266350	215600	502.750	54.47	63.05	439.700
N°32	267500	217500	499.100	71.19	73.55	425.550
N°33	263250	209125	507.500	28.50	SEC	479.000
N°34	266280	217650	500.000	///	64.35	435.650
N°35	265300	213400	504.620	///	55.72	448.900
N°36	264000	213400	497.727	43.45	SEC	454.277
N°37	256000	220100	438.200	34.03	33.00	405.200
P1 ST ONM	271200	232750	473.000	//	32.67	440.330
P3 TIGHENNIF	288770	233600	495.000	//	38.11	456.890

BE: BASSES EAUX.

Les 40 puits utilisés dans cette étude, sont illustrés sur la carte de localisation présentée dans la figure III.1

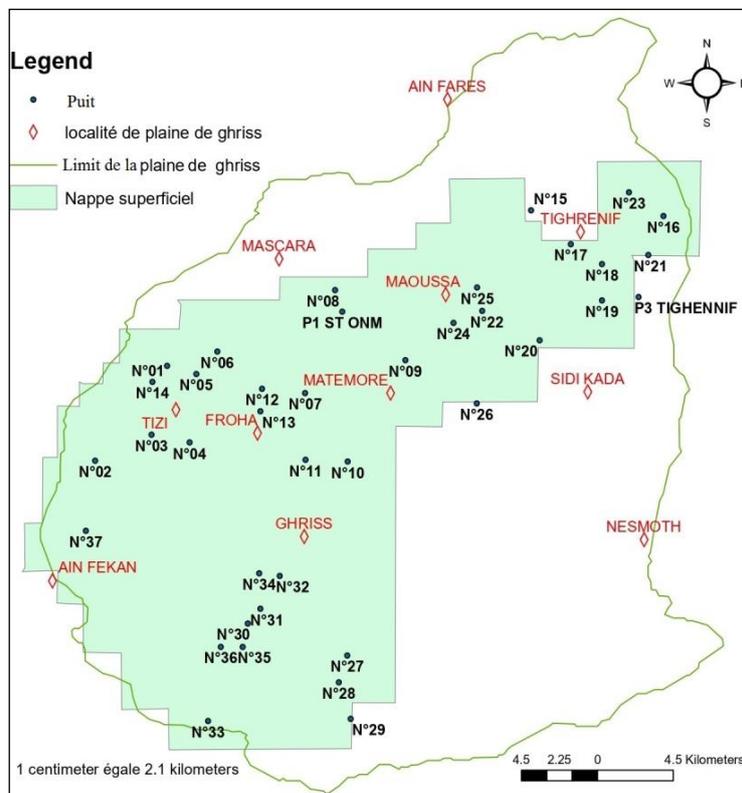


Figure III. 1 : Localisation des puits étudiés sur la zone d'étude avec le logiciel ArcGis.

III.3 Démarche de l'étude

La distribution spatiale des données piézométriques de la plaine de Ghriss est analysée à l'aide d'un logiciel SIG. La version 10.8 du logiciel ArcGis est utilisée dans cette étude.

La figure III.2 illustre la procédure d'élaboration de la carte piézométrique de la nappe supérieure de la plaine de Ghriss. Cette procédure est divisée en plusieurs étapes qui comprennent :

- La collecte et l'intégration des données existantes,
- L'exploration des données,
- Le choix des méthodes d'interpolation spatiale
- La comparaison des résultats cartographiques obtenus par validation croisée.

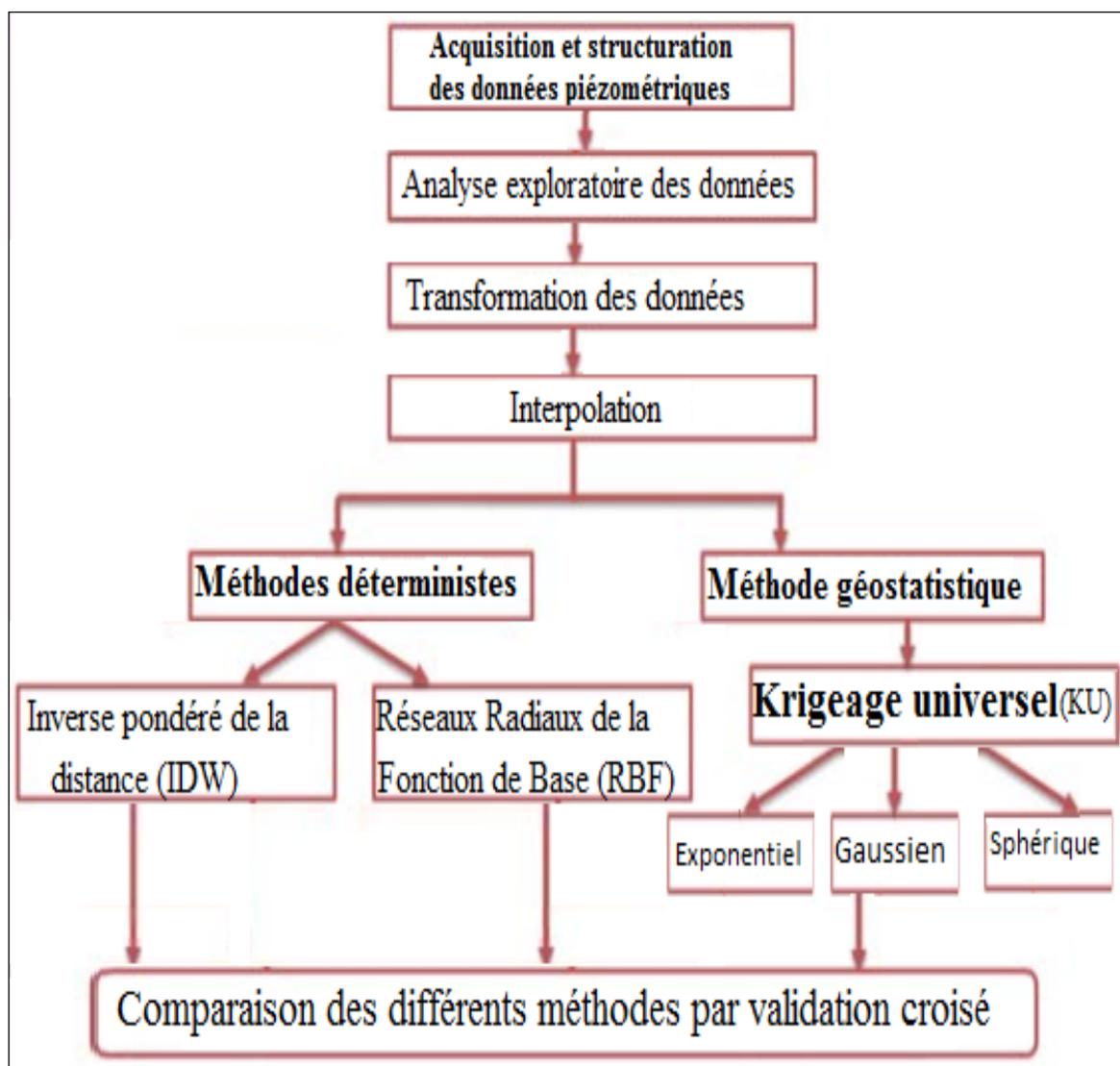


Figure III. 2 : Schéma général présentant la démarche de l'étude.

III.4 Analyse exploratoire des données piézométriques

Un analyse exploratoire des données piézométriques est réalisée à l'aide de l'outil "ESDA" (Exploratory Spatial Data Analysis) disponible dans le logiciel ArcGIS. Cet outil permet de visualiser, analyser et étudier la distribution spatiale des données piézométriques.

Plusieurs méthodes d'exploration de données sont possibles avec dans l'outil « ESDA » de ArcGIS :

III.4.1 Exploration des données piézométriques par le diagramme de Voronoï

Le diagramme de Voronoï de type « Cluster » dans l'outil Geostatistical Analyst, permet de rechercher d'anomalies dans les données. Il nous montre des Cellules inhabituellement grandes ou des cellules avec des couleurs différentes (valeurs) au milieu d'un changement progressif de couleurs, cela signifie que ces puits sont éloignés des autres ou échantillonnent un aquifère différent de l'aquifère ciblé. Ceci est dû, peut-être, à une erreur dans la collecte de données ou une anomalie réelle dans la distribution spatiale des puits (voir figure III.3a).

Après avoir supprimé ces anomalies de nos données, nous retrouvons avec seulement 39 données de piézomètres utilisables. Nous retrouvons ainsi une distribution sans anomalies apparente comme indiqué sur la figure III.3b.

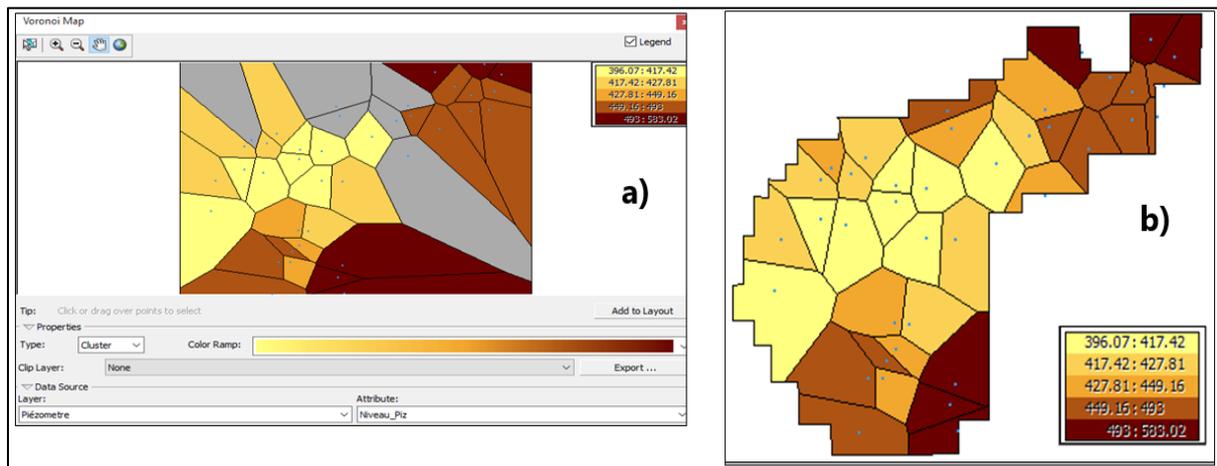


Figure III. 3 : Diagramme de Voronoï par la méthode 'Cluster' avant et après élimination de données anormales.

III.4.2 Exploration des données piézométriques par l'outil Histogramme

La distribution des données, illustrée par l'histogramme de la figure III.4, montre un aspect asymétrique à gauche (la queue de la distribution s'étend vers le côté gauche), cette série statistique est donc uni-modale.

De plus, le coefficient d'asymétrie « Skewness = 1,2739 », dans cette analyse de 39 points de données, indique une asymétrie avec un écart vers les valeurs fortes (à droite de l'histogramme) et la valeur du coefficient d'aplatissement « kurtosis = 4,7498 > 3 » indique une distribution leptokurtiques qui montres également une asymétrie dans la distribution des données.

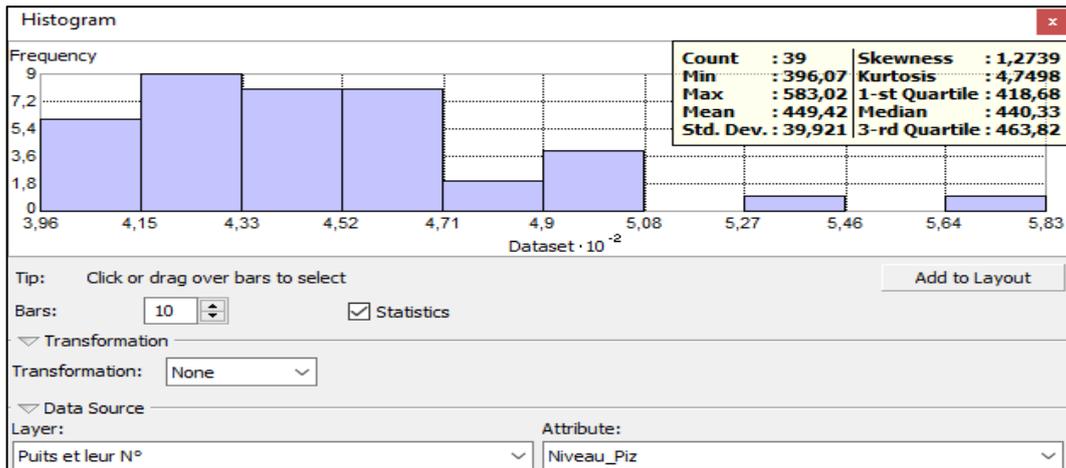


Figure III. 4 : Histogramme et statistiques des données piézométriques brutes.

III.3 Cartographie de la piézométrie par les méthodes déterministes

Pour illustrer l'influence de la méthodologie sur la carte résultante, deux méthodes déterministes sont explorées dans cette étude, à savoir : la méthode IDW et la méthode RBF.

III.3.1 Cartographie de la piézométrie par la méthode IDW

La cartographie de la piézométrie par la méthode IDW (Inverse Distance Weighting) est une technique d'interpolation qui estime les niveaux piézométriques à des emplacements non échantillonnés à partir des données piézométriques de puits répartis sur la plaine de Ghriiss. Elle repose sur le principe de pondération inverse de la distance, où les valeurs inconnues sont estimées en fonction de la distance des points de données connus les plus proches. L'interpolation de la piézométrie par la méthode IDW, se déroule en trois (3) étapes dans l'outil « Geostatistical Wizard » d'ArcGis :

III.3.1.1 Choix de la méthode et l'ensemble de données

Dans la section Méthodes, on choisit "l'interpolation pondérée de la distance", qui se trouve sous "Méthodes déterministes", puis dans la section "Données d'entrée" on sélectionne le fichier de données (piézométrie) et l'attribut "Niveau_Piez" dans la section "Champ de données" (voir figure III.5).

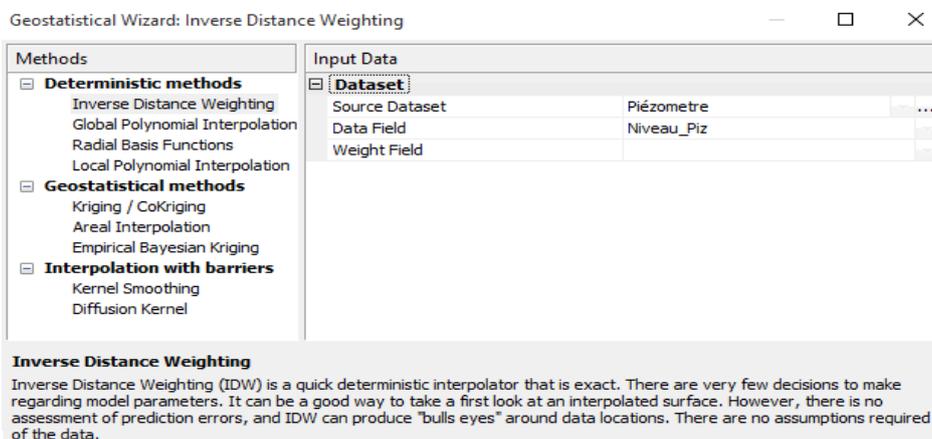


Figure III. 5 : Choix de la méthode et l'ensemble de données dans la méthode IDW.

III.3.1.2 Paramètres de la méthode IDW

Nous commençons par l'ajustement du voisinage de recherche qui est primordial et doit être effectué avant de toucher la valeur de la Puissance car la puissance change avec elle. Nous les ajustons donc, comme indiqué dans la figure III.6. En ce qui concerne la valeur de puissance, nous utilisons une option pour l'optimiser en cliquant sur le bouton Optimiser. Le processus d'optimisation évalue plusieurs modèles et choisit la valeur de puissance qui donne le modèle avec l'erreur quadratique moyenne la plus faible dans la validation croisée.

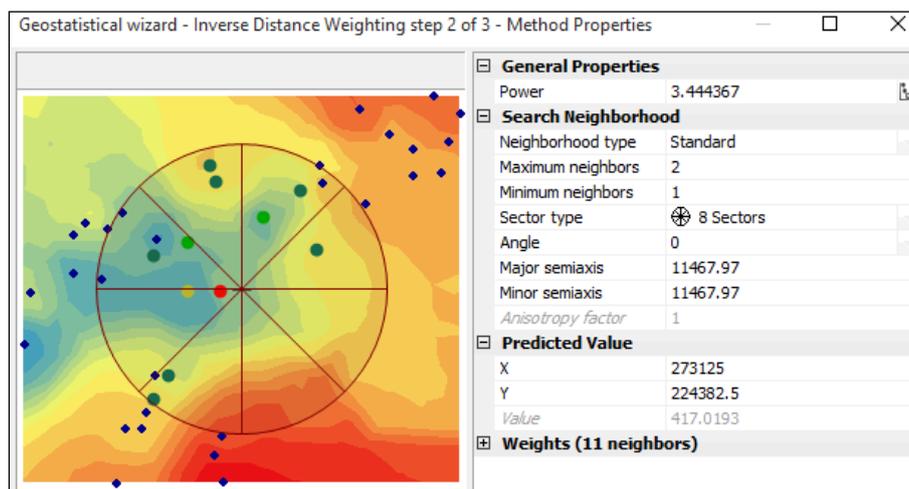


Figure III. 6 : Paramètres de la méthode IDW

III.3.1.3 Validation croisée

La qualité de l'ajustement du modèle est évaluée à l'aide des graphiques des prédictions et des erreurs ainsi que des informations récapitulatives sur les erreurs de prédiction, comme le montre la figure III.7.

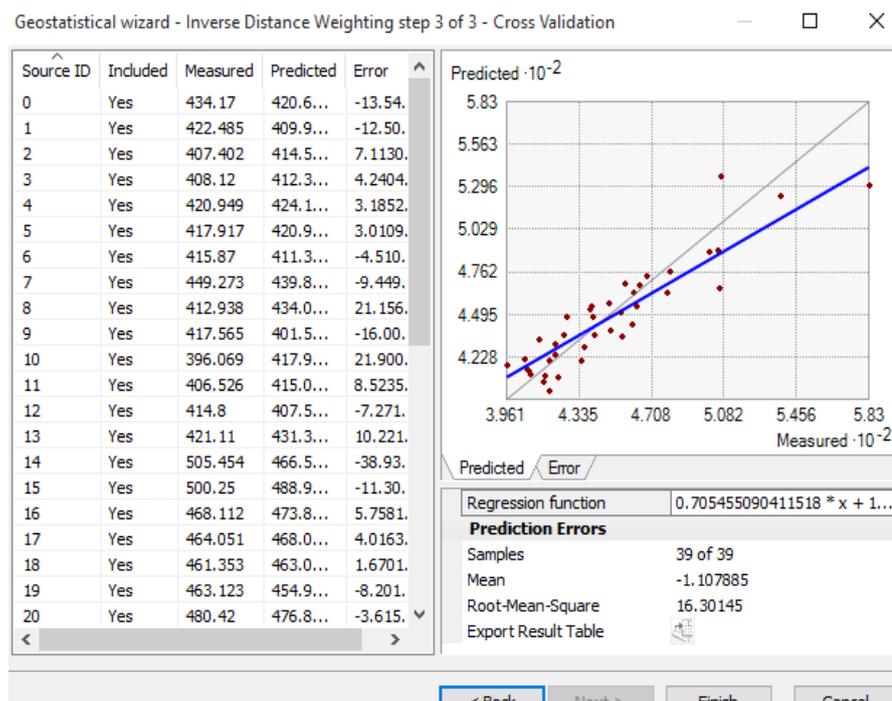


Figure III. 7: Validation croisée de la méthode IDW.

Pour le modèle ajusté par la méthode IDW une moyenne des erreurs égale à -1.107m et un écart type des erreurs égal à 16.30 sont obtenus.

III.3.2 Cartographie de la piézométrie par la méthode RBF

La cartographie de la piézométrie par la méthode RBF (Radial Basis Function) est une technique d'interpolation qui utilise des fonctions de base radiale pour approximer la piézométrie à partir de points de mesures des puits répartis sur la plaine de Ghriss.

L'interpolation de la piézométrie par la méthode RBF, se déroule en trois (3) étapes dans l'outil « Geostatistical Wizard » d'ArcGis :

III.3.2.1 Choix de la méthode et l'ensemble de données

Dans la section Méthodes, on choisit "Fonctions de Base radiales", qui se trouve sous "Méthodes déterministes", puis dans la section "Données d'entrée" on sélectionne le fichier de données (piézométrie) et l'attribut "Niveau_Piéz" dans la section " Champ de données" (voir figure III.8).

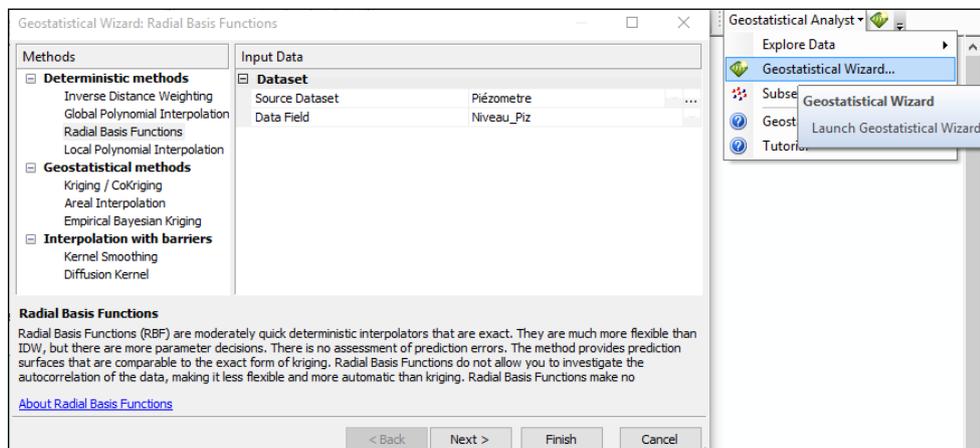


Figure III. 8 : Choix de la méthode et l'ensemble de données dans la méthode RBF.

III.3.2.2 Paramètres de la méthode RBF

Premièrement, la valeur du "Paramètre Kernel", de la méthode RBF, est optimisée automatiquement en cliquant sur le bouton Optimiser, qui choisira la valeur du paramètre noyau, pour la fonction noyau sélectionnée, ce qui donne le modèle avec l'erreur quadratique moyenne la plus faible. On ajuste également, les options de recherche de voisinage (voir Figure III.9).

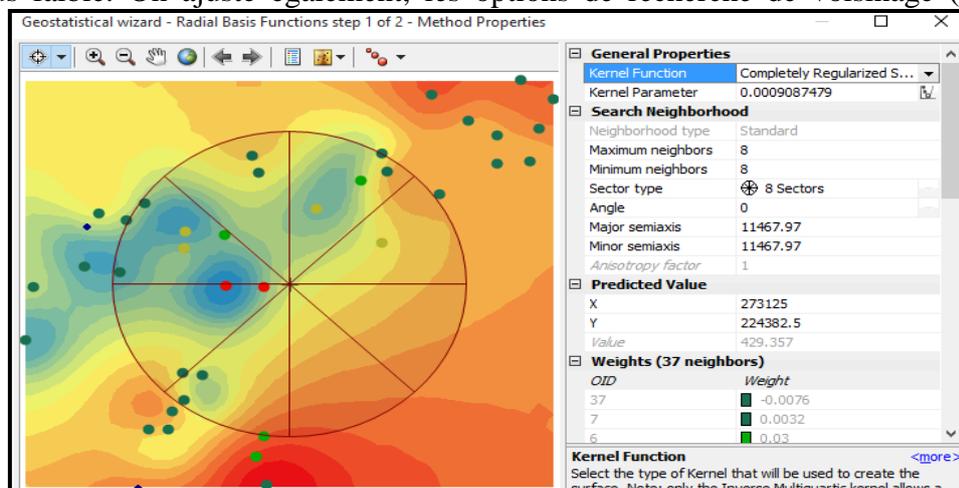


Figure III. 9: Paramètres de la méthode RBF.

III.3.2.3 Validation croisée

La qualité de l'ajustement du modèle est évaluée à l'aide des graphiques des prédictions et des erreurs ainsi que des informations récapitulatives sur les erreurs de prédiction, comme le montre la figure III. 10.

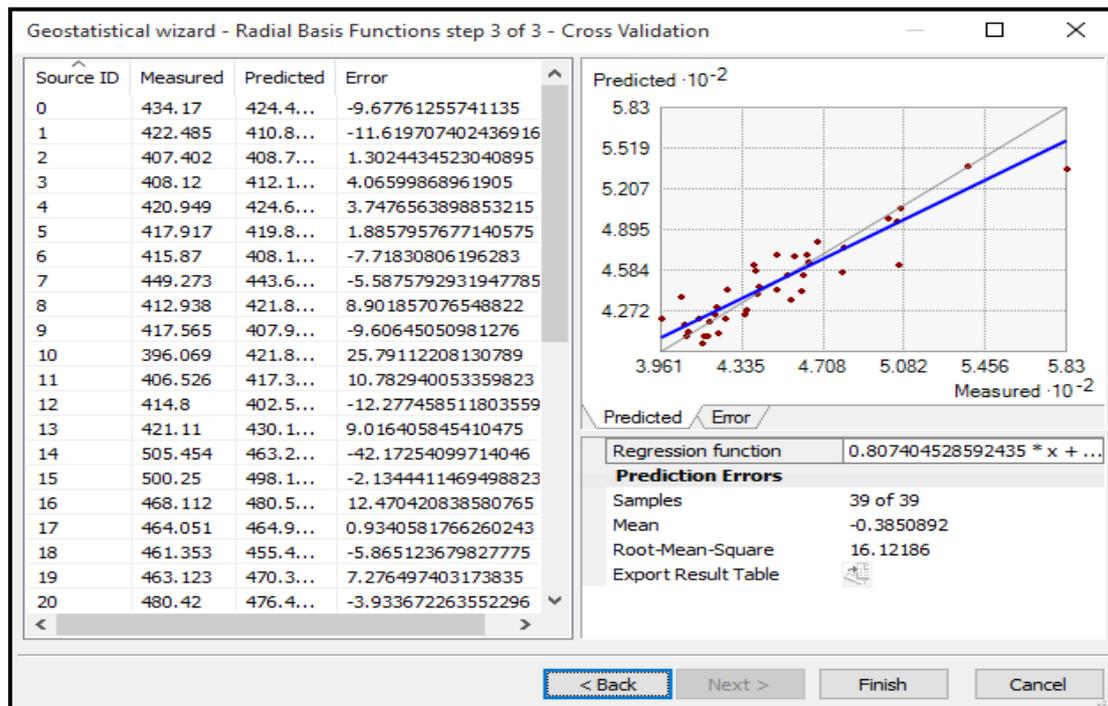


Figure III. 10: Validation croisée de la méthode RBF.

Pour le modèle ajusté par la méthode RBF une moyenne des erreurs égale à -0.39m et un écart type des erreurs égal à 16,12 sont trouvés.

III.4 Cartographie de la piézométrie par les méthodes géostatistiques

La géostatistique est une discipline de plus en plus utilisée pour cartographier les variables régionalisées. L'une des méthodes géostatistiques les plus employées est le krigeage, qui présente l'avantage de restituer la continuité spatiale de la variable étudiée.

Le krigeage est un processus en plusieurs étapes qui comprend une analyse de stationnarité et de tendance dans les données, la modélisation du variogramme et enfin la création de la surface.

III.4.1 Normalisation données

Le krigeage, repose sur l'hypothèse de stationnarité. Cette hypothèse exige, en partie, que toutes les valeurs des données proviennent de distributions normales.

Des transformations des données sources peuvent être utilisées pour rendre les données brutes normalement distribuées. En utilisant le tableau des probabilités et statistiques dans le livre « Probabilités, analyse des données et statistique » de G. Saporta (éd. Technip) p. 587, on trouve que pour un nombre de points $n = 40$, la valeur de Skewness à ne pas dépasser est égale à 0.87 pour un risque de 5 %.

Pour modifier la valeur du paramètre de transformation, on a utilisé la transformation Box Cox (exponentielle) disponible dans l'outil histogramme de Geostatistical Analyst. Après plusieurs itérations et affichage, on a pu approcher la valeur à ne pas dépasser qui est égale à 0,87 avec un coefficient de transformation Box Cox = -0,68 comme indiqué dans la figure III.11.

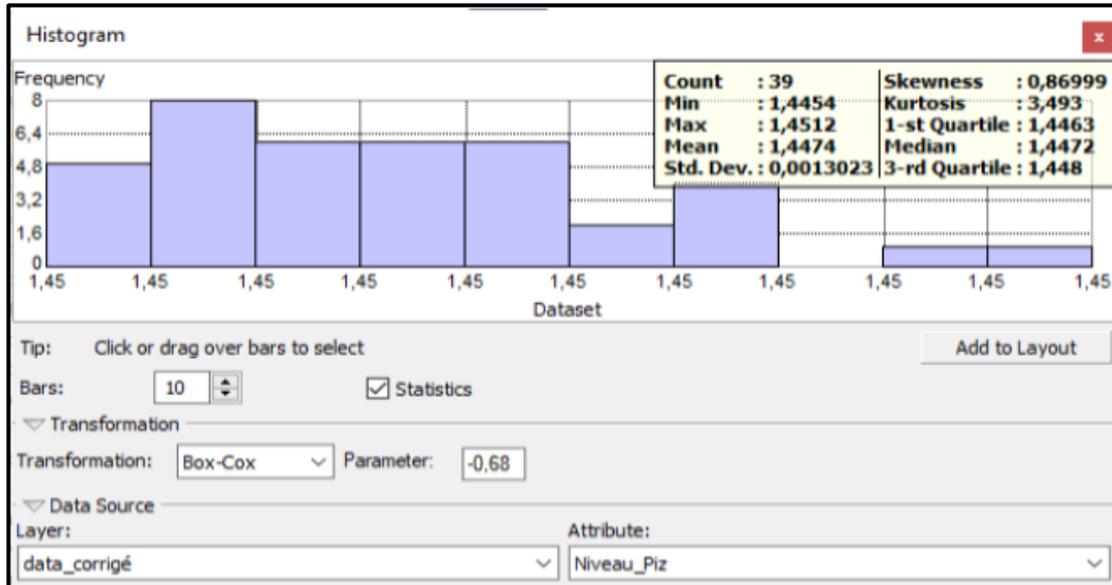


Figure III. 11: Transformation des données brutes en données normalement distribuées.

III.4.2 Analyse de tendance dans les données

L'outil d'analyse de tendance d'ArcGIS permet d'identifier la présence d'une dérive, qui est considérée comme la tendance moyenne de la variable (Cardenas, 2004). Cet outil offre une vue en trois dimensions des données piézométriques. Les emplacements des puits sont tracés sur le plan x, y (points rouges sur la figure III.12).

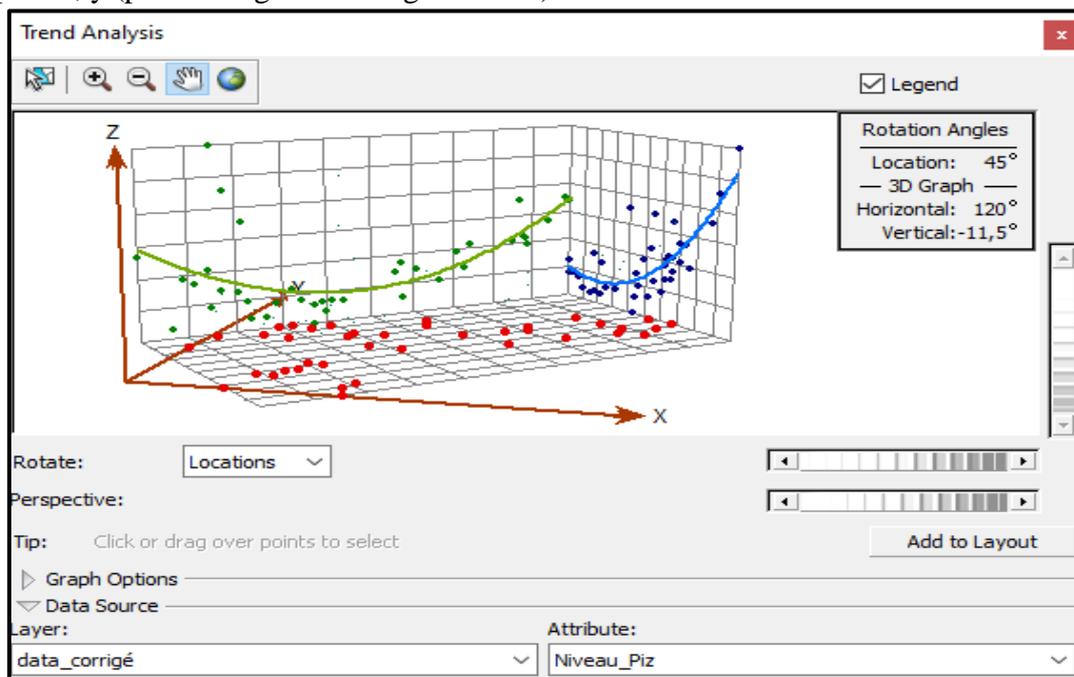


Figure III. 12 : Identification d'une tendance dans les niveaux piézométriques selon la direction 45°

Après ajustement de la direction, il est constaté que le nuage de points montre une relation entre les valeurs des points et les directions. Cette relation est présente entre les directions 0° et 320° , mais elle est plus marquée dans la direction 270° .

La figure III.12 révèle la présence d'une dérive, visible sur les courbes verte et bleue, évaluées par un polynôme d'ordre 2 dans la direction 45° . En effet, cette direction correspond au sens principal de l'écoulement de la nappe de Ghriss.

L'existence d'une dérive implique le calcul de nouveaux paramètres. Il est important de maintenir le degré de la dérive aussi bas que possible car plus il y a de coefficients à estimer, moins le modèle est précis. Pour cette raison, la dérive d'ordre 1 a été retenue pour cette étude.

III.4.3 Variogramme expérimental omnidirectionnel

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 expérimental omnidirectionnel de la nappe supérieure de la plaine de Ghriss est d'abord établi en considérant toutes les directions (Voir figure III.13).

Le variogramme expérimentale est calculé en considérant l'équation I.3 du chapitre 1. Ce variogramme est estimé sur une distance totale d'environ 35km et une distance de décalage égale à 500m. Le pas d'échantillonnage ainsi choisi vise à disposer d'un nombre suffisant de couples de points, permettant au variogramme expérimental de révéler au mieux la continuité spatiale de la piézométrie.

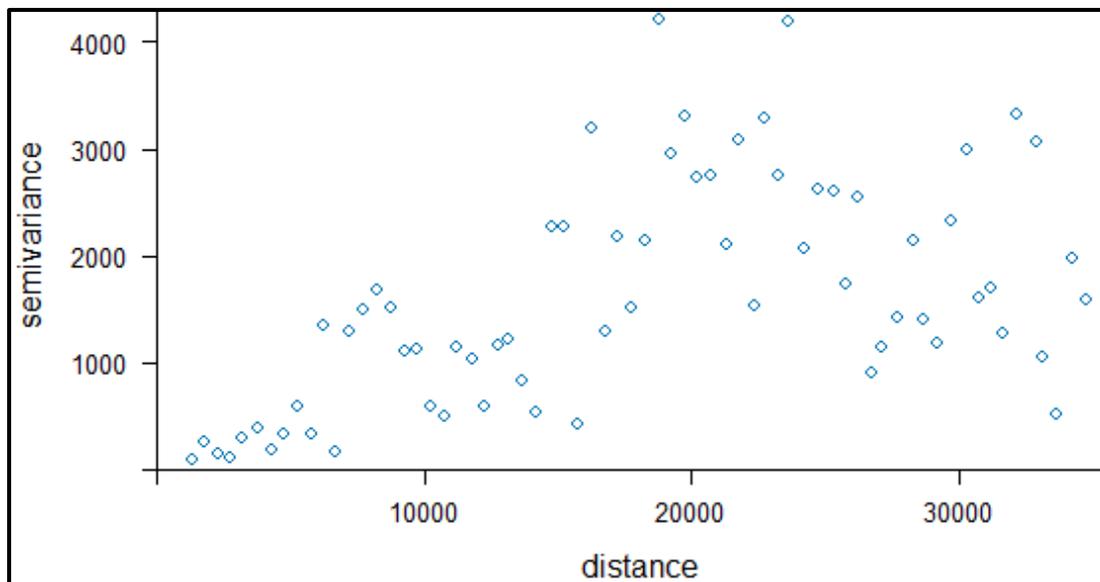


Figure III. 13: Variogramme expérimental omnidirectionnel.

III.4.4 Anisotropie

Dans l'analyse variographique, il est nécessaire de créer des variogrammes directionnels pour explorer l'anisotropie des données.

La figure III.14 présente les variogrammes directionnels calculés selon les directions 0° , 45° , 90° et 135° avec un angle de tolérance égal à $22,5^\circ$ selon l'équation I.4 du chapitre I.

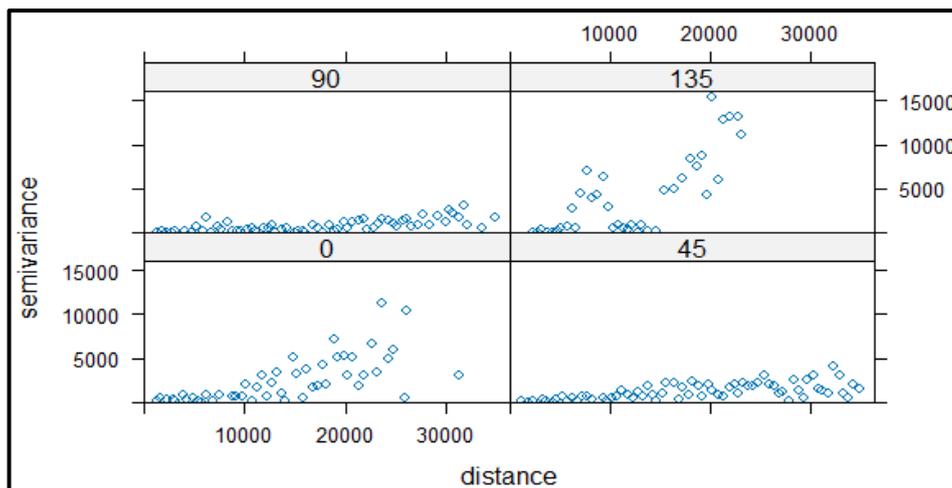


Figure III. 14: Variogrammes directionnels selon les quatre directions 0°, 45°, 90° et 135°.

Selon la figure III.14, les variogrammes directionnels correspondant aux directions 90° et 45° représentent plus d'informations et de données que les deux autres variogrammes.

En effet, avec des portées totales qui dépassent les 35000m, ces deux variogrammes représentent très bien l'échantillonnage de la zone d'étude. Ces deux directions correspondent respectivement aux directions Sud-ouest et Ouest de la plaine de Ghriss. Ce sont les principales directions du gradient hydraulique et donc du sens de l'écoulement des eaux souterraines.

Cependant, la direction 45° semble être la direction principale d'anisotropie avec la grande portée définit par le demi-grand axe de l'ellipse décrivant les portées correspondantes aux directions 90° et 45° (voir figure III.15).

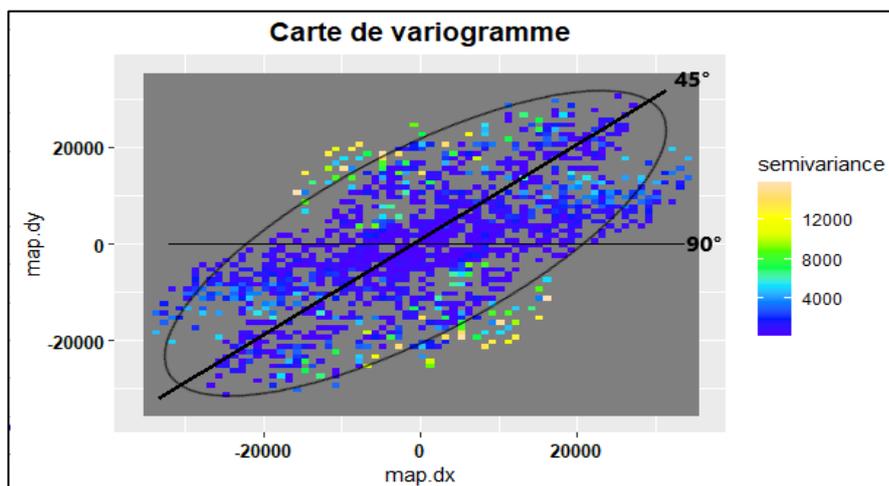


Figure III. 15: Carte variographique illustrant l'anisotropie dans l'ensemble de données.

La figure III. 16, permet également d'illustrer beaucoup mieux les quatre variogrammes directionnels. Ils révèlent une anisotropie géométrique, puisque pour le même palier, qui est défini par une variance égale à 1593,646m² et indiqué par la ligne mauve discontinue sur la figure III.16, on obtient différentes étendues chacune selon une direction différente.

La figure III.16 révèle une anisotropie principale dans la direction 45°, et une portée d'environ 14000m. En effet, pour cette direction, le variogramme expérimental atteint la variance (palier) pour une portée égale à 14000m. Il signifie que les données piézométriques sont in-corrélées au-delà de cette distance. Donc, la modélisation du variogramme expérimental doit se faire pour cette étendue dans la suite des traitements des données.

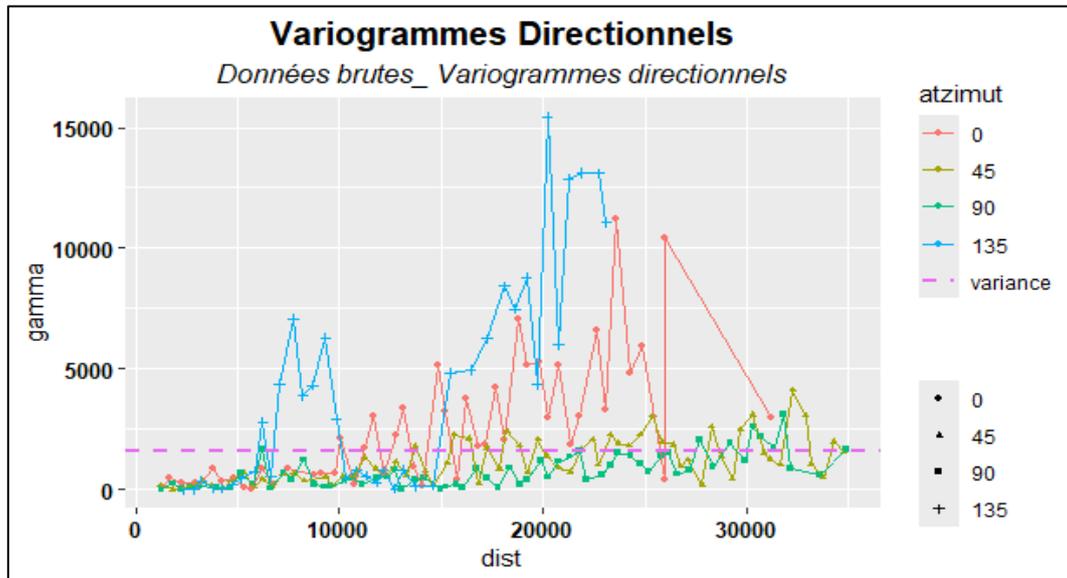


Figure III. 16: Variogrammes directionnels selon les 4 directions 0°, 45°, 90° et 135° et variance.

III.4.5 Ajustement du variogramme théorique et calibration du modèle

L'ajustement du variogramme théorique constitue une étape essentielle dans la modélisation géostatistique. Cette phase permet de déterminer le modèle mathématique qui décrit le mieux la structure spatiale des données. Le modèle ainsi obtenu est ensuite utilisé pour interpoler les valeurs des variables d'intérêt aux points non échantillonnés.

Il n'est pas toujours facile de trouver le modèle théorique qui correspond au mieux au variogramme expérimental. Dans cette étude trois types de modèles théoriques sont testés et ajustés aux données piézométriques, à savoir : le modèle sphérique, le modèle gaussien et le modèle exponentiel. Les figures III.17, III.18 et III.19 présentent le variogramme expérimental et les modèles théoriques ajustés aux données.

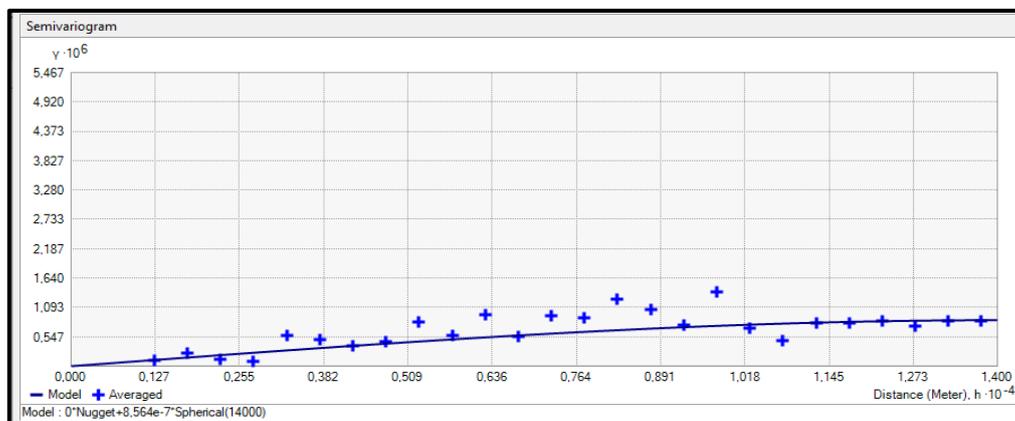


Figure III. 17: variogramme expérimental et le modèle sphérique ajusté aux données piézométriques.

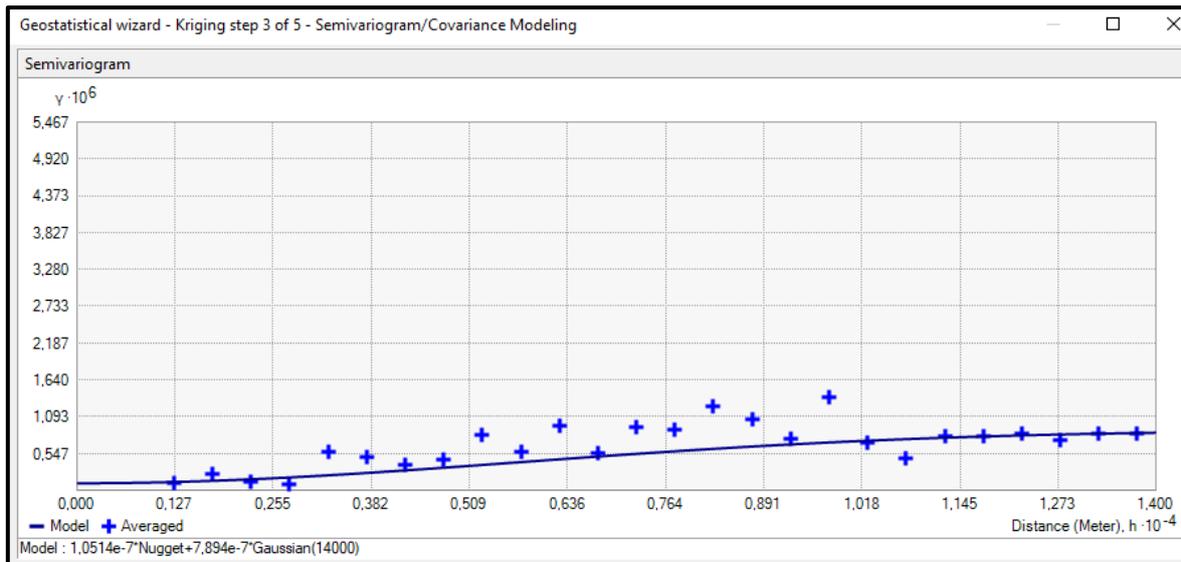


Figure III. 18: variogramme expérimental et le modèle gaussien ajusté aux données piézométriques.

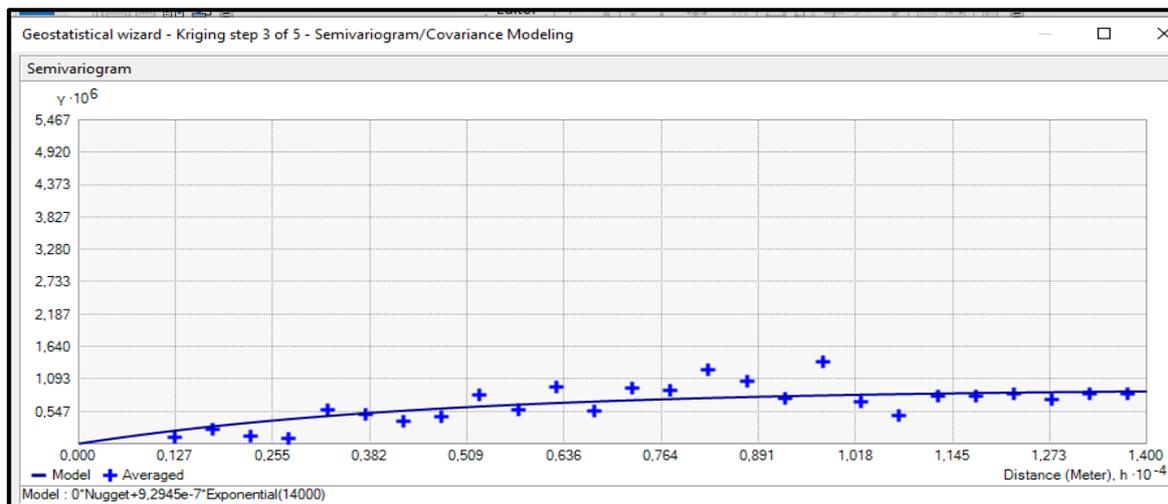


Figure III. 19: Semi-variogramme expérimental et le modèle exponentiel ajusté aux données piézométriques.

Les valeurs des paramètres des variogrammes théoriques des trois modèles sont présentées dans le tableau III.2.

Tableau III. 2: Caractéristiques des trois modèles de variogramme théorique.

Type du modèle	Portée mineure (m)	Palier partiel (m ²)	Effet de pépité (m ²)	Pas d'échantillonnage (m)	Nombre de pas
Sphérique	6000	0.00599653	0	500	28
Gaussien	6000	0.0049556	0.0011428	500	28
Exponentiel	6000	0.0052952	0	500	28

La calibration des modèles d'interpolation faite à travers l'interface du Geostatistical wizard du logiciel ArcGis s'est déroulée en plusieurs étapes :

1. La première étape consiste à choisir la méthode d'interpolation, le fichier de données et l'attribut à interpoler (figure III.20.a).
2. La deuxième étape consiste à choisir le type de krigeage, la transformation des données et son paramètre (figure III.20.b).
3. La troisième étape consiste à approcher la tendance dans les données par une fonction polynomiale dont les paramètres sont estimés grâce aux données. Il est conseillé de garder le degré de la dérive aussi bas que possible pour simplifier les équations de calcul (Johnston et al., 2001). Nous avons retenu, dans cette étude une fonction de degré un pour modéliser cette dérive (figure III.20.c).
4. La quatrième étape consiste à élaborer un modèle de semivariance. Un variogramme omnidirectionnel a été calculé avec un pas égal à 500m et un nombre de pas égal à 28. Un angle d'anisotropie est également calculé dans cette étape (figure III.20.d).
5. Dans la cinquième étape on définit les paramètres qui régissent le choix du voisinage (le nombre des points échantillons, la limite et la forme du voisinage), le but est de trier parmi les points échantillons ceux qui auront le plus de poids dans l'interpolation. Le voisinage choisi est de forme éclipse, de demi-petit axe =7072,25m et demi-grand axe= 14000m et 15 points par secteur (figure III.20.e).

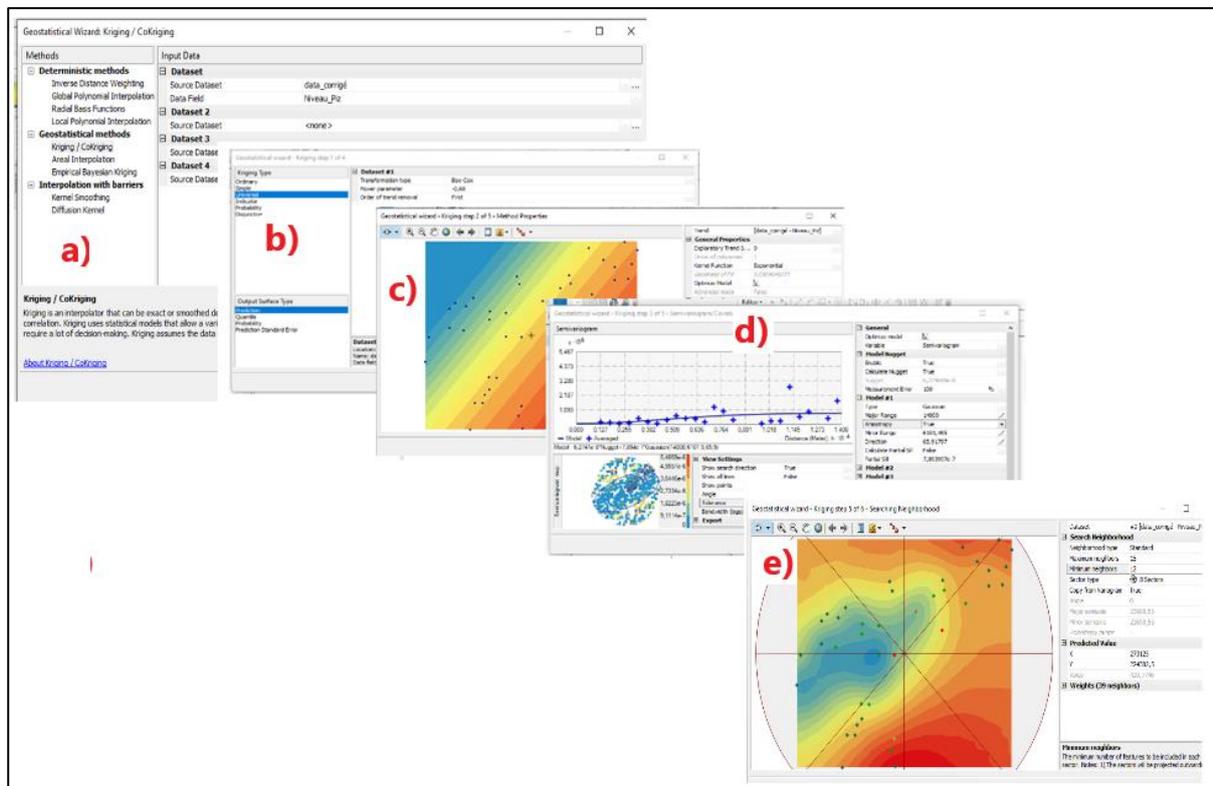


Figure III. 20: Etapes de la calibration des modèles d'interpolation mises en œuvre dans l'interface du Geostatistical wizard.

III.4.6 Validation croisée

La dernière étape, de la calibration des modèles, comporte la vérification des choix qui ont été faits dans les étapes précédentes à l'aide de la validation croisée. Cette dernière, consiste à estimer un point, avec le modèle décidé (un point dont on connaît la valeur après l'avoir éliminé des données d'entrée). En faisant cela successivement sur tous les sites de mesure, on obtient le graphe qui représente les résultats d'une validation croisée, avec les valeurs mesurées en abscisses et les valeurs estimées en ordonnées (voir figure III.21), complété par des statistiques d'erreur globale.

Dans cette étape plusieurs itérations de traitement sont faites, afin d'obtenir des valeurs optimales d'erreur. On cherche à faire en sorte que (<https://pro.arcgis.com/fr/pro-app/latest/tool-reference/geostatistical-analyst/cross-validation.htm>):

- La moyenne des erreurs (équation III.1) et la moyenne des erreurs standardisées (équation III.2) soient proches de zéro :

$$\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{z}(s_i) - z(s_i))}{n} \quad (\text{III.1})$$

$$\frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\hat{z}(s_i) - z(s_i)}{\hat{\sigma}(s_i)} \right)}{n} \quad (\text{III.2})$$

- L'écart type de l'erreur (équation III.3) et la moyenne des erreurs standardisées (équation III.2) soient très proches l'un de l'autre :

$$\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{z}(s_i) - z(s_i))^2}{n}} \quad (\text{III.3})$$

- L'écart type de l'erreur réduite soit proche de un.

$$\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\hat{z}(s_i) - z(s_i)}{\hat{\sigma}(s_i)} \right)^2}{n}} \quad (\text{III.4})$$

Donc plus l'écart type est faible plus la valeur interpolée est en moyenne conforme à la réalité, et donc plus la carte est précise (Isaaks et al., 1989).

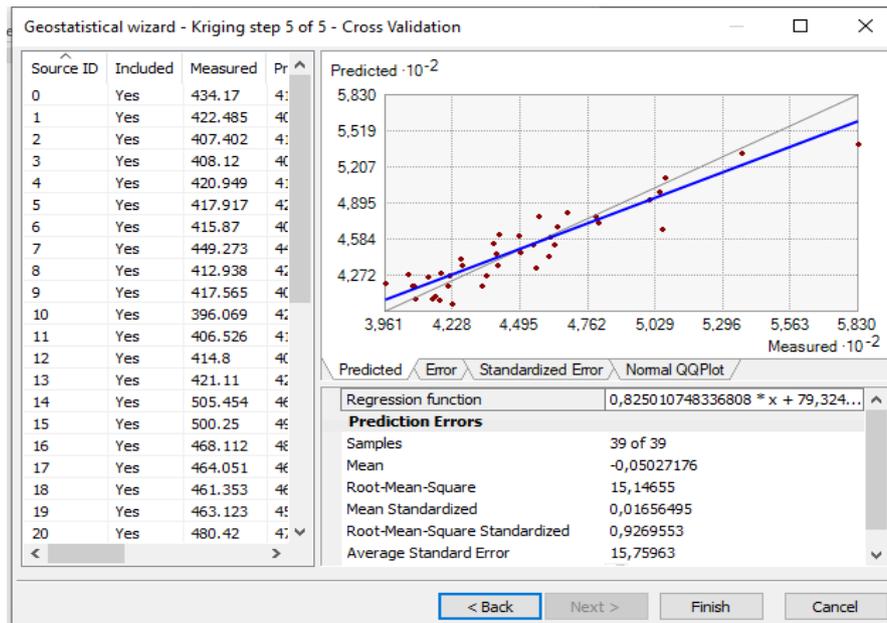


Figure III. 21: Validation croisée mise en œuvre dans l'interface du Geostatistical wizard.

III.4.7 Choix du meilleur modèle théorique

Cette étape consiste à comparer la validation croisée des trois modèles théoriques (sphérique, gaussien et exponentiel), pour choisir le plus adapté aux données piézométriques de la plaine de Ghriiss.

La figure III.22 montre que, parmi les trois modèles théoriques testés, le modèle gaussien est le plus proche au variogramme expérimental que les deux autres modèles.

En effet, avec un écart type égale à 15,15m et une moyenne des erreurs égale à -0,05m, le modèle gaussien est meilleur que le modèle sphérique et le modèle exponentiel avec respectivement : des écarts types égaux à 16,65m et 18,12m et des erreurs moyennes égales à 0,09m et -0,27m.

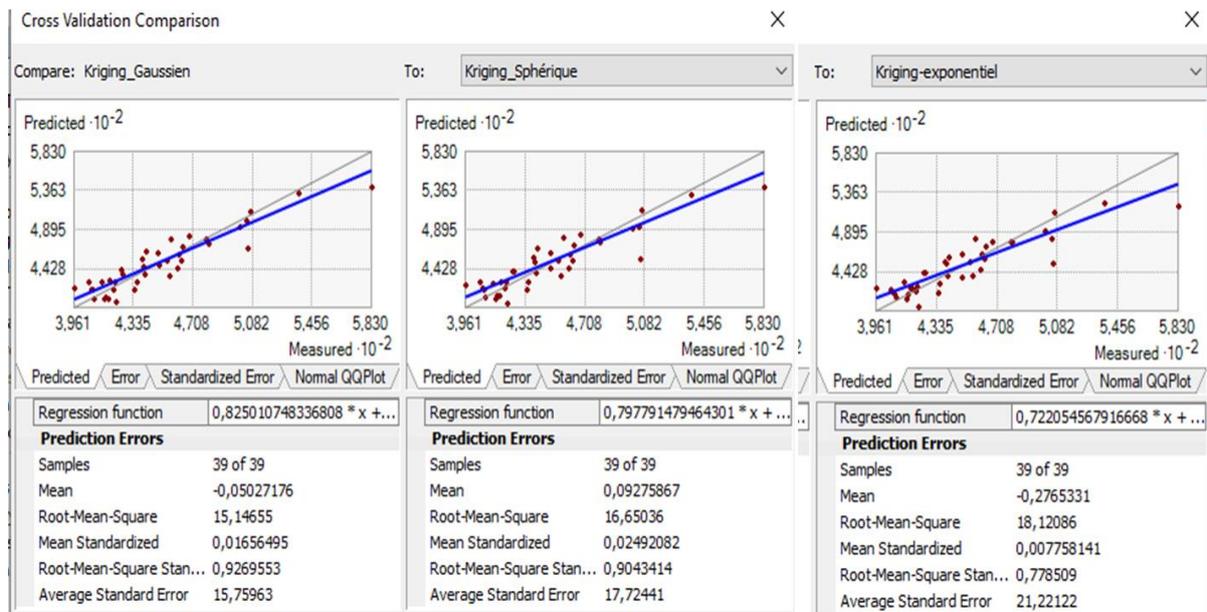


Figure III. 22: Comparaison de la validation croisée des trois modèles théoriques : gaussien, sphérique et exponentiel.

III.4.8 Carte des erreurs réduites de prédiction

La carte des erreurs réduites de prédiction (figure III.23), obtenue par Geostatisticalwizard du logiciel ArcGis, est caractérisée par des valeurs inférieures à 10m pour la plupart des points de mesure et supérieures à 10m dans les endroits dépourvus de points de mesure.

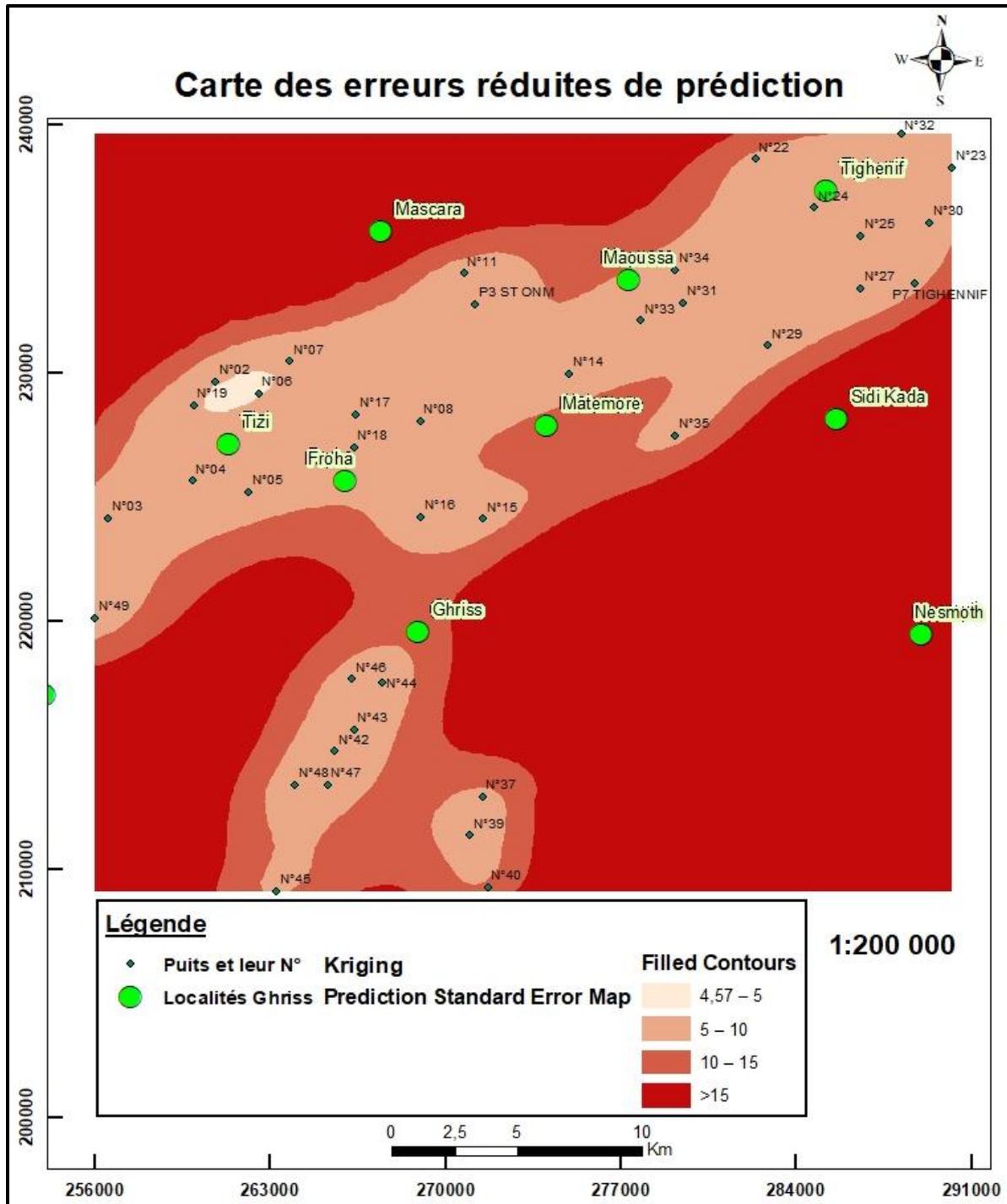


Figure III. 23: Carte des erreurs réduites de prédiction.

III.5 Comparaison entre les trois méthodes d'interpolation

Sur la base des résultats de la validation croisée fournis pour l'IDW, RBF et le krigeage universel gaussien (voir figure III.24), nous pouvons comparer ces méthodes d'interpolation à l'aide de fonctions de régression et d'erreurs de prédiction.

III.5.1 Résultats de la validation croisée

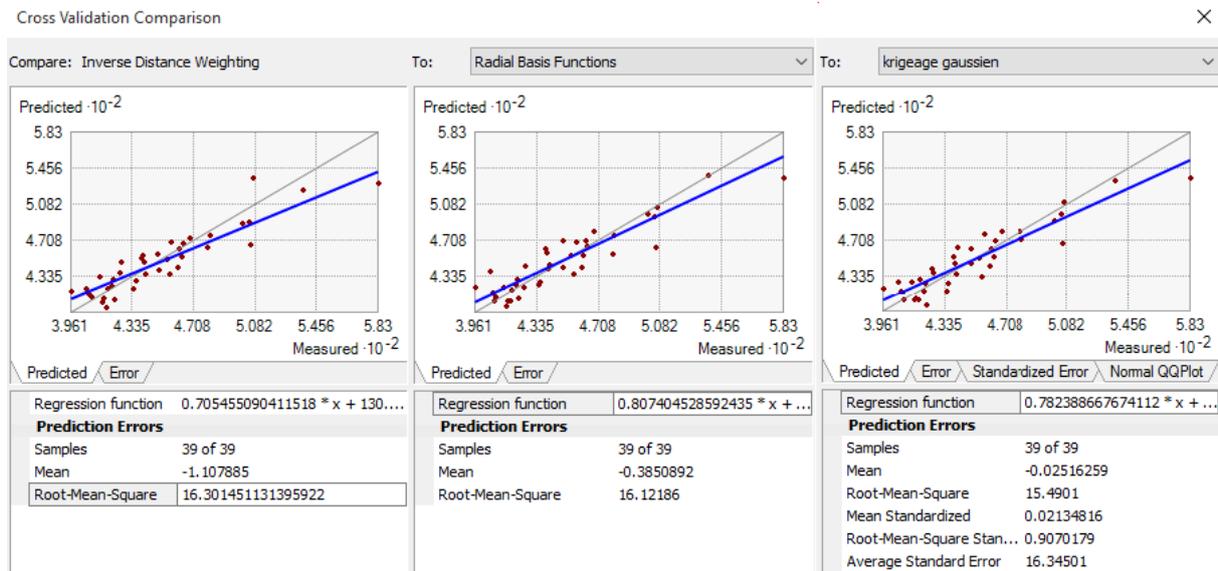


Figure III. 24: Les résultats de validation croisée fournis pour l'IDW, RBF et le krigeage universel gaussien.

Pour la méthode IDW : on obtient une droite de régression avec la fonction : $y = 0,7054 x + 130,6262$. On obtient, également, une moyenne des erreurs de prédiction égale à -1,1079 et un écart type moyen égal à 16.3015.

Pour la méthode RBF : on obtient une droite de régression avec la fonction : $y = 0,8074 x + 86,9872$. On obtient, également, une moyenne des erreurs de prédiction égale à -0,3851 et un écart type moyen égal à 16.1219.

Pour la méthode du Krigeage Universel Gaussien : on obtient une droite de régression avec la fonction : $y = 0,7824 x + 97,7741$. On obtient, également, une moyenne des erreurs de prédiction égale à -0,0252 et un écart type moyen égal à 15,4901.

III.5.2 Comparaison par la fonction de régression

Les fonctions de régression pour le krigeage universel gaussien et RBF ont des pentes similaires, le RBF ayant une ordonnée à l'origine légèrement plus élevée. IDW a une pente plus faible et une interception plus élevée par rapport au RBF et au krigeage universel gaussien.

III.5.3 Comparaison par l'erreur de prédiction

La méthode du krigeage universel gaussien a une erreur de prédiction moyenne et un écart type quadratique moyen les plus faibles, indiquant une meilleure précision prédictive par rapport aux deux méthodes IDW et RBF. La méthode IDW a l'erreur de prédiction moyenne et l'erreur quadratique moyenne la plus élevée parmi les trois méthodes.

En conclusion, et sur la base des résultats de validation croisée obtenus, la méthode du krigeage universel gaussien semble surpasser les deux méthodes IDW et RBF en termes de précision prédictive, avec l'erreur de prédiction moyenne et l'écart quadratique moyen les plus faibles.

III.6 Carte de piézométrie de la plaine de Ghriss

Après avoir analysé nos données, validé nos résultats et déterminé la méthode et le modèle d'interpolation les plus appropriés pour notre piézométrie, une interpolation des données piézométriques est faite et une carte piézométrique de la nappe superficielle de la plaine de Ghriss est établie (figure III.25).

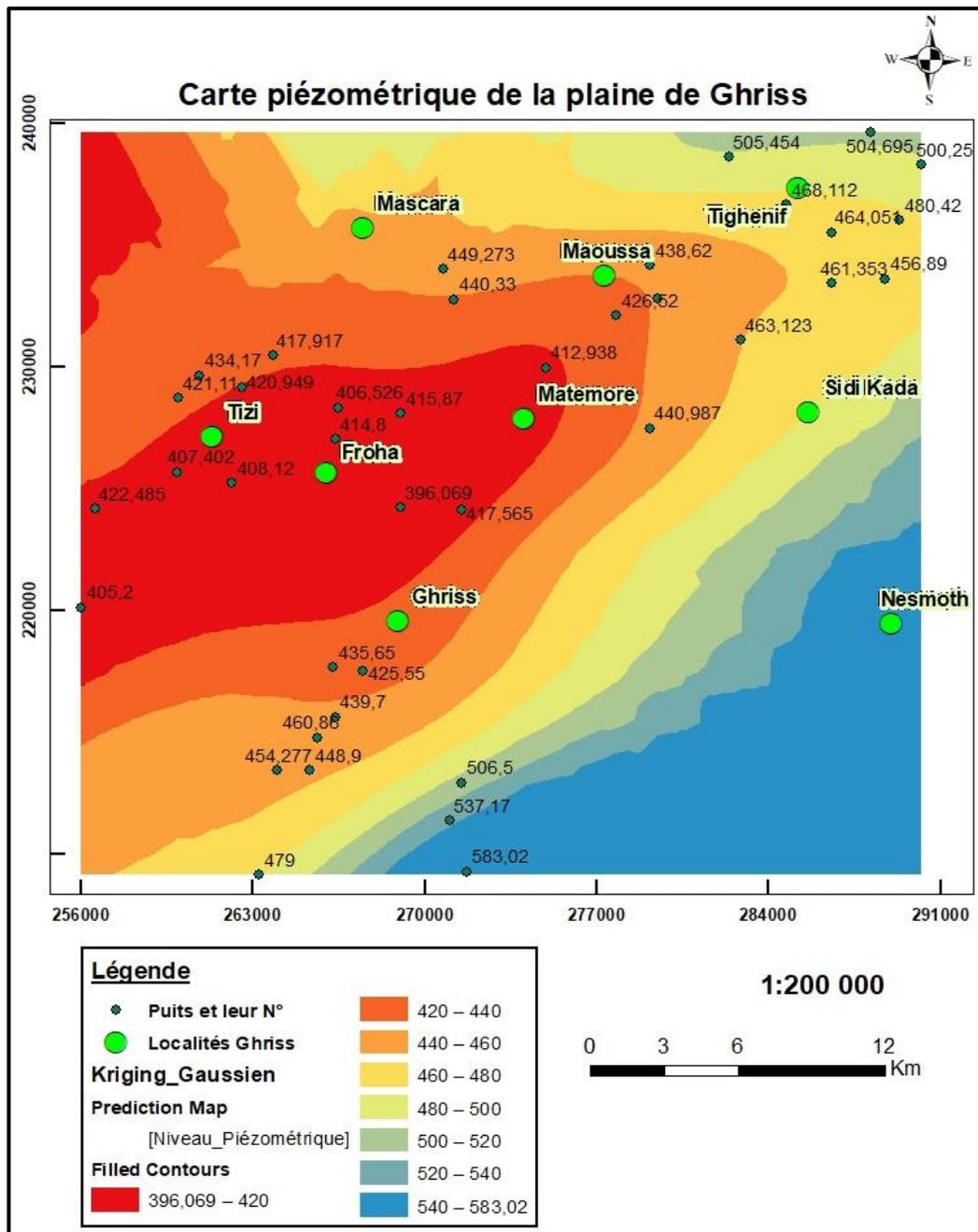


Figure III. 25: Carte de piézométrie de la nappe superficielle de la plaine de Ghriss.

Les niveaux piézométriques montrent des valeurs basses à l'Ouest et au Sud-Ouest de l'aquifère avec des niveaux qui varient entre 396m et 440m, en particulier dans les localités de Froha, Tizi et Matemore. Ceci est peut-être provoqué par le pompage excessif et à une surexploitation de l'aquifère dans cette zone.

La piézométrie est plus importante au Nord-Est et au Sud-Est de la plaine de Ghriss, avec des valeurs qui dépassent les 500m.

Le sens de l'écoulement des eaux souterraines se dirige du Nord-Est et Sud-Est vers le Sud-ouest et l'Ouest de la plaine de Ghriss.

III.7 Conclusion

Pour la sélection du modèle le plus approprié, pour l'interpolation de la piézométrie de la nappe superficielle de la plaine de Ghriss, une comparaison rigoureuse de trois modèles de krigeage: sphérique, exponentiel et gaussien, est faite.

Grâce à une analyse complète et à une validation croisée, le modèle gaussien a montré des performances supérieures en termes de précision prédictive et de qualité d'ajustement.

Cette étude a impliqué également, la comparaison entre deux méthodes déterministes, à savoir : la méthode IDW et la méthode RBF, ainsi qu'une méthode géostatistique : le krigeage. Parmi les trois méthodes explorées, la méthode IDW a donné les résultats les moins satisfaisants, avec une erreur de prédiction relativement plus élevée que les deux méthodes RBF et Krigeage. La méthode RBF, tout en étant plus performante que l'IDW, est moins bonne par rapport à l'approche géostatistique en termes de précision prédictive.

La méthode du krigeage avec le modèle d'ajustement gaussien, est apparue comme la méthode d'interpolation la plus efficace, démontrant des performances supérieures pour minimiser les erreurs de prédiction et fournir des estimations piézométriques fiables.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Le processus de sélection d'une méthode d'interpolation appropriée pour cartographier la piézométrie dans les études hydrogéologiques revêt une importance primordiale.

Dans le cas de la plaine de Ghriss dans la wilaya de Mascara, où la disponibilité des données est limitée et le système hydrogéologique présente une hétérogénéité et une non-stationnarité significatives, les défis de l'interpolation sont prononcés. Il devient impératif de choisir une méthode capable de résoudre efficacement ces complexités pour garantir l'exactitude et la fiabilité des résultats interpolés.

Cette étude comparative, entre méthodes d'interpolation, vise à démontrer la nécessité d'un examen attentif pour le choix de la méthode d'interpolation la mieux adaptée aux caractéristiques spécifiques de la zone d'étude. Le processus de sélection de la méthode d'interpolation la plus appropriée nécessite une évaluation complète basée sur des mesures statistiques rigoureuses.

La validation croisée et l'écart type d'erreur jouent un rôle central dans l'évaluation de la précision et de la fiabilité des méthodes d'interpolation. En effet, en quantifiant les erreurs associées aux prédictions et en validant les performances des méthodes par validation croisée, cette approche systématique garantit que la méthode sélectionnée fournit non seulement des résultats précis dans la zone d'étude, mais présente également des performances cohérentes dans différents scénarios et ensembles de données.

L'évaluation et la comparaison des trois méthodes d'interpolation à savoir : les deux approches déterministes IDW et RBF ainsi que la méthode du krigeage universel, a permis de mettre en évidence que la méthode du krigeage avec le modèle gaussien est la plus adaptée à l'interpolation de la piézométrie de la plaine de Ghriss. Ce choix est justifié par sa performance à minimiser les erreurs de prédiction et à fournir des estimations fiables.

En conclusion, le choix de la méthode d'interpolation dépend des caractéristiques des données, des exigences de précision, des ressources disponibles et de l'expérience de l'utilisateur avec les différentes techniques. Ainsi la prise de décision est plus éclairée dans l'optique d'une gestion durable des aquifères de la plaine de Ghriss.

Référence bibliographique

Référence bibliographique

- BEKKOUSSA B., MEDDI M et JOURDE H., 2008.** Forçage climatique et anthropique sur la ressource en eau souterraine d'une région semi-aride : cas de la plaine de Ghriss (Nord-Ouest algérien). *Sécheresse* 2008 ; 19 (3) : 173-84.
- Belabdi Sabrina., Benaouda Kheira., Berrouane Wassila. 2022.** Etude Comparative de la qualité des eaux souterraine dans la région de Sidi Kadda et Mamounia Wilaya de Mascara. Mémoire de fin d'études.0
- Benaouali Abdelkader , Stanisław Kachel, 2017.** *Un cadre intégré basé sur un substitut pour l'optimisation de la conception aérodynamique d'une forme de plan d'aile subsonique* Actes of l'Institution of Mechanical Engineers, party G Journal of Aerospace Engineering 232(3).10.1177/0954410017699007.
- Benadela Abdelkader., Bekkoussa, Belkacem. (2017)** - Application de la géostatistique en hydrogéologie. Springer.
- Cardenas Marcelo. (2004)** - Hydrologie des cours d'eau : Une introduction pour les écologistes. Wiley-Blackwell.
- Cressie Noel. (1993)** - Statistiques pour données spatiales. Éditions Technip.
- Davis James Clayton. (1986)** - Statistiques et analyse de données en géologie. Éditions Technip.
- Franke Richard. (1982)** - Interpolation lisse de données dispersées par des splines locales à plaque mince. *Informatique et Mathématiques Appliquées*, 8(3), 273-281.
- Floch, Jean-Michel. (2018)** - Hydrogéologie : Principes et pratiques. Éditions Technip.
- Floch Jean-Michel, 2018.** *Manuel d'analyse spatiale Théorie et mise en oeuvre pratique avec R, Géostatistique.* Insee Méthodes n° 131, chap 5, p13.
- Fetter Charles Willard. (2001)** - Hydrogéologie appliquée. Éditions Technip.
- Johnston Robert., Smith Thomas., Jones Laura. (2001)** - Statistiques environnementales et analyse des données. Éditions Technip.
- Hutchinson Michael Freeman. (1991)** - Réseaux de neurones et leurs applications en géosciences. Éditions Technip.
- Isaaks Edward H., & Srivastava Mohan Raghunath. (1989)** - Introduction à la géostatistique appliquée. Éditions Technip.
- Isaaks Edward H., Srivastava R. Mohan. (1989)** - Géostatistique quantitative. Elsevier.
- Gasmi Abderrahmane., BENHAMI Abdelfatah. 2015.** Aptitude à l'irrigation des eaux souterraine dans la plaine de Ghriss. Mémoire de Fin D'étude de Master en chimie.
- Gomez Antonio., Garcia Manuel. (1998)** - Modélisation de l'écoulement des eaux souterraines et du transport des contaminants. Presses de l'Université CRC.

Référence bibliographique

Lakhdari Fakhreddine Tahar. 2013. « Contribution à la connaissance de la stygofaune d'Algérie: Etude de la qualité de l'eau et la faune aquatique des puits de la région de Mascara (Nord Ouest Algérien). ». Mémoire de Magister. UNIVERSITE ABOU BAKR BELKAID-TLEMCEM.

Marcotte Denis. (2003) - Hydrologie souterraine : Modèles conceptuels et computationnels. Éditions Technip.

Martin Jean., Gomez Antonio., Garcia Manuel. (1989) - Pollution des eaux souterraines : Sources, gestion et remédiation. Butterworth-Heinemann.

Rogers Roger. (2003) - Introduction concise à la géophysique appliquée. Éditions Technip.

Saporta Gilbert. (éd.) (Technip) (1990) - Probabilités, analyse des données et statistique. Éditions Technip.

Shepard Donald. (1968) - Une fonction d'interpolation bidimensionnelle pour données irrégulièrement espacées. Revue de l'Association pour la Computing Machinery, 23, 517-524.

Sourisseau Jean Claude. (1972) - Hydrogéologie : Principes et applications. Éditions Technip.

Srivastava Mohan Raghunath. 2013. Geostatistics and Orebody Modelling. Toronto: FSS Canada Consultants Inc.

Thomas Huth. (2003) - Hydrogéophysique appliquée. Springer.

Watson David F. (1992) - Interpolation et contouring de données spatiales : Guide d'analyse et d'affichage. Éditions Technip.

<https://portailsig.org/content/grass-gis-pas-pas-pour-les-debutants-7-les-modules-d-interpolation-spatiale-introduction-pas.html>

<https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/tool-reference/geostatistical-analyst/cross-validation.htm>