

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique Université

Echahid Hamma Lakhdar El-Oued



Faculté de Technologie



Département : Hydraulique et Génie Civil

MEMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du diplôme du Master en Hydraulique

Option : Ouvrage hydraulique

THEME

Estimation spatiale des données
hydrogéologiques

Par krigeage dans la nappe aquifère
cas d'El-Oued souf

Dirigé par :

Mme : ZAIR Nadjat

présenté par :

- Hamid Zoubir

- Mansouri Abdelrazak

Promotion : 2022/2023

Remerciements

D'abord, nous remercions fort bien dieu qui donne l'opportunité d'apprendre langue différente de la mienne ,qui m'a permis, de rédiger ce mémoire.

Nous remercions à tous les enseignants et les étudiants du département d'hydraulique.

Plus profonde gratitude va à. DR- ZAIR Nadjat pour ses efforts, sa collaboration avec nous et ses conseils et orientations dans notre note de fin d'études. En fin, Nous remercions tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce travail et ceux qui travaillent pour la science et le pays.

Résumé

Diverses sciences dans différentes disciplines nécessitent d'interpoler de nombreux paramètres. La géostatistique, avec son étape d'analyse structurelle, est largement utilisée à cette fin. A l'aide de variogramme, cette étape précieuse peut être utilisée pour évaluer la corrélation et la dépendance des données. Cependant, un mauvais choix du modèle de variogramme peut biaiser tous les résultats de prédiction.

La présente étude montre comment l'utilisation d'un modèle de variogramme inadapté peut sérieusement fausser les résultats d'une analyse prédictive.

L'influence de la sélection du modèle de variogramme est mise en évidence et enrichie par des cartes thématiques élaborées à l'aide de trois modèles différents (gaussien, sphérique et exponentielle).

Pour éviter un tel inconvénient, une approche méthodique pour sélectionner le modèle le plus approprié, basée sur le calcul et l'analyse des indicateurs statistiques tel que la variance et l'écart type de l'erreur résiduelle, est proposé. Cela peut réduire l'effet indésirable de la sélection du modèle de variogramme sur une opération d'interpolation utilisant la technique de krigeage.

Mots clés : géostatistique, variogramme, prédiction, modèles, interpolation, Krigeage.

Abstract

Various sciences in different disciplines require interpolating many parameters. Geostatistics, with its structural analysis step, is widely used for this purpose. Using variogram, this valuable step can be used to assess the correlation and dependence of the data. However, a wrong choice of the variogram model can bias all the prediction results.

The present study shows how the use of an unsuitable variogram model can seriously skew the results of a predictive analysis.

The influence of the selection of the variogram model is highlighted and enriched by thematic Maps developed using three different models (Gaussian, spherical and exponential).

To avoid such a drawback, a methodical approach to select the most appropriate model, based on the calculation and analysis of statistical indicators such as the variance and the standard deviation of the residual error, is proposed. This can reduce the undesirable effect of selecting the variogram model on an interpolation operation using the kriging technique.

Keywords: Geostatistics, variogram, prediction, models, interpolation, Kriging.

ملخص

تتطلب العلوم المختلفة في مختلف التخصصات استيفاء العديد من الخصائص. تستخدم الجيو إحصائية التحليل الإنشائي على نطاق واسع لهذا الغرض. باستخدام المتباين النصفية، يمكن استخدام هذه الخطوة القيمة لتقييم الارتباط والاعتماد على البيانات. ومع ذلك، يمكن أن يؤدي الاختيار الخاطئ لنموذج المتباين إلى تحيز جميع نتائج التنبؤ.

توضح الدراسة الحالية كيف يمكن أن يؤدي استخدام نموذج شبه مخطط غير مناسب إلى تحريف نتائج التحليل التنبئي بشكل خطير. حيث يتم تسليط الضوء على تأثير اختيار نموذج شبه المخطط وإثرائه من خلال خرائط موضوعية تم تطويرها باستخدام ثلاثة نماذج مختلفة.

لتجنب مثل هذا العيب، تم اقتراح منهج لاختيار النموذج الأنسب، بناءً على حساب وتحليل المؤشرات الإحصائية مثل التباين والانحراف المعياري للخطأ. مما يمكن من تقليل من التأثير غير المرغوب فيه لاختيار نموذج المتباين النصفية على عملية الاستيفاء باستخدام تقنية "كريجينغ".

الكلمات المفتاحية: الجيو إحصائية ، متباين نصفية ، التنبؤ ، نماذج ، استيفاء ، "كريجينغ"

Sommaire

Remerciements	I
Résumé	II
Abstract.....	III
Sommaire.....	V
Liste des figures.....	VII
Liste des tableaux	IX
Liste des Abréviations	X
Introduction Général.....	a-c
I . Présentation de la zone d'étude:	1
I.1 Situation géographique 'El-Oued	2
I.2 Cadre social et économique de Souf:	3
I.2.1 L'artisanat:	3
I.2.2 Le commerce:	3
I.2.3 L'industrie:	4
I.2.4 L'agriculture:.....	4
Conclusion :	13
II . Contexte géologique : Étude Géologique.....	15
Introduction	15
II.1 Aspects Structuraux.....	15
II.2 La plate-forme saharienne:	16
II.3 Structure géologique général:	16
II.4 Cadre géologique de la région d'oued souf :	17
II.5 Stratigraphie régionale :	17
II.6 Formations de l'ère Secondaire :	19
II.6.1 Le Barrémien :	19
II.6.2 Formation De L'ère Tertiaire :	21
II.6.3 Formation De L'ère Tertiaire :	22
II.6.4 Formation Du Quaternaire :	23
III . Hydrogéologie.....	27

Sommaire

Introduction	27
III.1 Cadre hydrogéologique général :.....	27
III.1.1 Présentation des aquifères dans la zone d'étude :.....	28
III.1.2 Nappe phréatique :	28
III.1.3 Nappe Complexe Terminal :	30
III.1.4 Nappe du Continental Intercalaire :	35
IV . Les méthodes d'interpolation spatiale :	41
IV.1 Méthodes d'interpolation spatiale :	41
IV.1.1 Méthodes déterministes :.....	41
IV.1.2 Méthodes probabilistes.....	43
IV.1.3 Krigeage :	44
IV.1.4 Le Variogramme :	45
V . Outils numérique utilise logiciel surfer :	51
Introduction :	51
V.1 Présentation de l'interface du logiciel :.....	51
V.1.1 Mise en forme le fichier Excel :.....	52
V.1.2 Affichage des points :.....	53
V.1.4 Créer une grille x, y, z :.....	55
V.1.5 Les Méthodes de quadrillage (Gridding Methods) :	56
V.1.6 Les méthodes de quadrillage comprennent	56
V.1.7 Composants du variogramme :.....	61
V.1.8 Montage du variogramme surfer :.....	65
VI . Validation sur un cas réel.....	68
VI.1 La piézométrie de la zone d'étude :.....	68
VI.1.1 Inventaire des points d'eau :.....	68
VI.1.2 Evolution de la piézométrie :	69
VI.2 Estimation le niveau piézométrique de la commune d'Eloued :.....	71
VI.2.1 Données et méthodes de traitement:	71
VI.2.2 Résultats et discussions:	74
Conclusion.....	88

Liste des figures

Figure 1 Situation géographique d'El-Oued 2023	2
Figure 2 : Histogramme des températures moyennes mensuelles (ONM 1989-2017).....	7
Figure 3 : Histogramme précipitations moyennes mensuelles (mm) (ONM 1989-2017)	8
Figure 4: Variation mensuelles de l'humidité relative moyenne (ONM 1989-2017).	9
Figure 5: Variation mensuelle de l'Evaporation moyenne (mm) (ONM 1989-2017).....	9
Figure 6: Histogramme des vitesses du vent moyennes mensuelles (m/s) (ONM 1989-2017).....	10
Figure 7: Diagramme Ombro-thermique d'El-Oued (ONM 1989-2017)	11
Figure 8: Plan Géologique de Grand Erg Oriental, (Baba Sy.M, 2005).....	16
Figure 9: La colonne litho stratigraphique du forage F1, (ANRH, 1993).	18
Figure 10: Coupe hydrogéologique à travers le Sahara (d'après UNESCO 1972).....	28
Figure 11: Zone d'alimentation de la nappe phréatique et le sens d'écoulement de la nappe	29
Figure 12: Piézométrie du Complexe Terminal (OSS, 2003).....	31
Figure 13 Coupe hydrogéologique.....	32
Figure 14: Coupe hydrogéologique d'El-Oued (A.N.R.H, 1989).....	33
Figure 15: Coupe hydrogéologique de la zone d'étude en 2010	33
Figure 16: Le sens d'écoulement des aquifères CT et CI (UNESCO, 1972).	35
Figure 17: Situation géographique des deux nappes aquifères le Continental Intercalaire et le Complexe Terminal (UNESCO, 1972).....	37
Figure 18: Résumé des méthodes d'interpolation déterministes	41
Figure 19: Les méthodes d'interpolation probabiliste	44
Figure 20: Schéma type d'un variogramme	46
Figure 21: Schéma de calcul du variogramme expérimental	47
Figure 22: Ajustement d'un modèle théorique (courbe) à un modèle expérimental(croix)	48
Figure 23 : Graphe d'un variogramme expérimental et son modèle d'ajustement	48
Figure 24: Modèle type de variogramme exponentiel	49
Figure 25: Modèle type de semivariogramme gaussien	49
Figure 26: Modèle type de variogramme sphérique	49
Figure 27: Barre des menus	51
Figure 28: Différentes cartes possibles.	52
Figure 29: Worksheet Surfer.....	53
Figure 30: Grille ouverte.....	54
Figure 31: Carte de contour	54
Figure 32: 3D Surface Map.....	55
Figure 33: Les options de quadrillage	55
Figure 34: Distance inverse à une puissance grille	57
Figure 35: Modified Shepard's Method grille	57
Figure 36: Triangulation with Linear Interpolation grille.....	58
Figure 37: Métriques de données grille	59
Figure 38: Grille de krigeage	60
Figure 39: Boîte de dialogue Options avancées de krigeage	60
Figure 40: Composants du variogramme	61
Figure 41: La Fenêtre des Propriétés du modèle expérimental.....	62
Figure 42: La boîte de dialogue Propriétés.....	63
Figure 43: Les modèles de variogramme	63
Figure 44: Statistiques.....	64

Liste des figures

Figure 45: L'éditeur de grille	64
Figure 46: Les paramètres du variogramme	65
Figure 47: Carte de répartition des points de mesures de la région d'étude	69
Figure 48: Carte piézométrique de la nappe de complexe terminale des communes de la région d'étude pour l'année 2023.....	70
Figure 49: Bloc diagramme 3D représentant le niveau piézométrique, données de 2023.....	71
Figure 50: Krigeage ordinaire et tendance et résidus correspondants	73
Figure 51: Krigeage par régression et tendance et résidus correspondants	74
Figure 52: Histogramme des fréquences des données piézométriques.....	75
Figure 53: Carte des données en quartiles (2023).....	76
Figure 54: Variogramme de niveau piézométrique mesuré (2023), démontrant l'anisotropie.....	77
Figure 55: Les variogramme expérimentaux et les modèles de variogramme ajustés aux données résultants du Krigeage universel pour les niveaux piézométriques de la zone d'étude.	77
Figure 56: Les variogramme expérimentaux et les modèles de variogramme ajustés aux données résultants du Krigeage par point pour les niveaux piézométriques de la zone d'étude.	78
Figure 57: Les cartes piézométriques produites selon les différentes méthodes d'interpolation spatiale retenue (2023) de la zone d'étude.....	79
Figure 58: Cartes de distribution des erreurs d'interpolation (MRE) pour chaque méthode.....	83
Figure 59: Cartes de distribution des erreurs d'interpolation (MRSE) pour chaque méthode	84
Figure 60: Comparaison graphique entre les valeurs interpolées issues de différentes techniques utilisées avec celles des données observées.....	85

Liste des tableaux

Tableau 1: Résumé des résultats obtenus.....	5
Tableau 2 Les températures moyennes mensuelles (ONM 1989-2017).....	7
Tableau 3 Les précipitations moyennes mensuelles (ONM 1989-2017).....	8
Tableau 4 : Humidité relative moyenne mensuelle (ONM 1989-2017).....	8
Tableau 5: Evaporation moyenne mensuelle (mm) (ONM 1989-2017).....	9
Tableau 6 : Vitesses du vent moyennes mensuelles (ONM 1989-2017).....	10
Tableau 7: données des précipitations et des températures moyennes mensuelles	11
Tableau 8: Bilan hydrique d’après Thorntwaite (ONM 1989-2017).....	12
Tableau 9: Les compositions lithologiques de la région d’étude	25
Tableau 10: Épaisseur moyenne des différents aquifères et estimation de la réserve	38
Tableau 11: Récapitulatif des systèmes aquifères d'El-Oued (D’après DRH 2005).	39
Tableau 12: Etude statistique des valeurs mesurées en 2023	74
Tableau 13: Caractéristiques de variogramme expérimentaux pour les deux méthodes de krigeage.....	78
Tableau 14 : Résultat de l’analyse par “Cross Validation	81
Tableau 15: Analyse statistique des résiduels de chaque méthode d’interpolation.....	82

Liste des Abréviations

ADE : Algérienne Des Eaux.

AEA : Alimentation en Eau d'Agriculture.

DPSB : Direction Programmation et Suivi Budget. AEI : Alimentation en Eau d'Industrie.

AEP : Alimentation en Eau Potable.

ANRH : Agence Nationale des Ressources Hydriques CI : Continental Intercalaire

CT : Complexe Terminal

DRH : Direction des Ressources Hydriques. GIRE : Gestion Intégrée de la Ressource en Eau. OMS : Organisation Mondiale de la Sante.

ONM : Office National Météorologique. DSA : Direction des Services Agricoles. DRH : Direction des Ressources Hydriques. DEM : Direction de L'Energie et des Mines.

Introduction Général

Introduction Général

La recherche environnementale est toujours basée sur des échantillons, mais dans l'ensemble, les résultats des mesures représentent la continuité de l'espace d'échantillonnage. La plupart des chercheurs veulent savoir quelle valeur peut représenter le lieu (Webster 2014). Même avec les mêmes données d'entrée, l'application de différentes méthodes d'interpolation peut produire des résultats différents (Amante 2016, Drouin 2010, Daniel 2008).

De plus en plus d'applications d'interpolation sont apparues dans divers domaines. Selon le modèle mathématique sur lequel elles reposent, les méthodes d'interpolation se répartissent généralement en deux catégories (Arnaud 2000) :

Les méthodes déterministes basées sur des propriétés purement mathématiques (généralement géométriques) «sans tenir compte du phénomène physique qui nous intéresse. A partir des valeurs mesurées environnantes, l'interpolation permet de déterminer les valeurs de résultat (Johnston 2001). Les interpolateurs tels que TIN (réseau triangulaire irrégulier), IDW (pondération par l'inverse de la distance) et LPI (interpolation polynomiale locale) sont classés comme méthodes déterministes.

Les méthodes géostatistiques qui font appel à des modèles probabilistes et découlent de l'analyse statistique des données considérées.

Danie Krige, un ingénieur minier d'Afrique du Sud, a d'abord proposé le concept d'une moyenne mobile pour surmonter le problème de surestimation des réserves minières par le système. Pour célébrer le mineur pionnier, le professeur Matheron a inventé le terme "Krigage" pour la méthode qu'il a développée (Sarma 2009).

En considérant la corrélation spatiale et en la modélisant, la géostatistique peut prédire assez correctement les variables environnementales avec une variance minimale et connue, contrairement à d'autres méthodes. La technique de prédiction par Krigage, nécessite un modèle mathématique pour décrire la covariance spatiale,

Introduction Général

généralement exprimée sous forme de variogramme, et grâce à sa forme paramétrée il est devenue l'outil principal de la géostatistique (Webster. 2015).

Les logiciels de modélisation, de géospatialisation et d'interpolation les plus cités sont ArcGis d'ESRI et Surfer de Gold Software. Le fonctionnement de ces logiciels est basé sur des techniques d'interpolation déterministes et géostatistiques.

Le krigeage est différent de toutes ces techniques, en raison de sa caractéristique impartiale d'être le meilleur estimateur linéaire sans biais (BLU Best Linear Unbiased) (Brenot 1975). Il est de loin la méthode la plus utilisée à cet effet dans tous les domaines des sciences de l'environnement dans le monde (Diodato 2004, Joseph 2007, Arétouyap 2016, Gharbia 2016).

La fiabilité de l'interpolation et de la prédiction passe par une étape préliminaire importante qui est l'analyse structurale centrée sur le variogramme. Cette étape est si importante que pour de nombreuses versions de Golden Surfer, les utilisateurs sont responsables du choix du modèle de variogramme approprié. En cas de doute entre plusieurs modèles de variogrammes, il est alors recommandé de les tester à l'aide de la méthode dite validation croisée qui consiste à retirer une à une chaque donnée et à la réestimer à partir des $N-1$ données restantes. La validation croisée permet d'évaluer si un des modèles retrouve mieux lors de l'estimation les valeurs mesurées. Il est également conseillé d'examiner l'impact pratique du choix du modèle sur l'estimation par krigeage et l'incertitude associée pour évaluer leur sensibilité (Bechler 2013).

L'objectif de cette étude est d'expliquer brièvement l'impact du choix du modèle de variogramme sur l'estimation par krigeage et l'incertitude associée afin d'en évaluer la sensibilité, et comment choisir le modèle le plus approprié. De tester les modèles de variogrammes par validation croisée ce qui permet de réduire l'effet du mauvais choix du modèle sur l'interpolation par la technique du krigeage.

Chapitre I

Présentation général de la zone d'étude

I. Présentation de la zone d'étude:

I.1 Situation géographique 'El-Oued

La wilaya d'El Oued se trouve au Sud-est de l'Algérie. Elle devint une commune depuis 1957, une wilaya depuis janvier 1984, ce découpage a pour but de faciliter les conditions de vie sociale, culturelle, professionnelle et de limiter les difficultés dues à l'isolement, aujourd'hui, elle compte douze daïras et trente communes jusqu'en 2019, puis, respectivement, onze et vingt-deux depuis cette date à la suite de la création de la wilaya d'El M'Ghair³. Ses limites sont les suivantes:

- Au nord, par les wilayas de Tébessa, Khenchela et Biskra
- A l'ouest par les wilayas d'El M'Ghair et de Touggourt;
- Au sud et par la wilaya de Ouargla ;
- Et à l'est par la Tunisie.

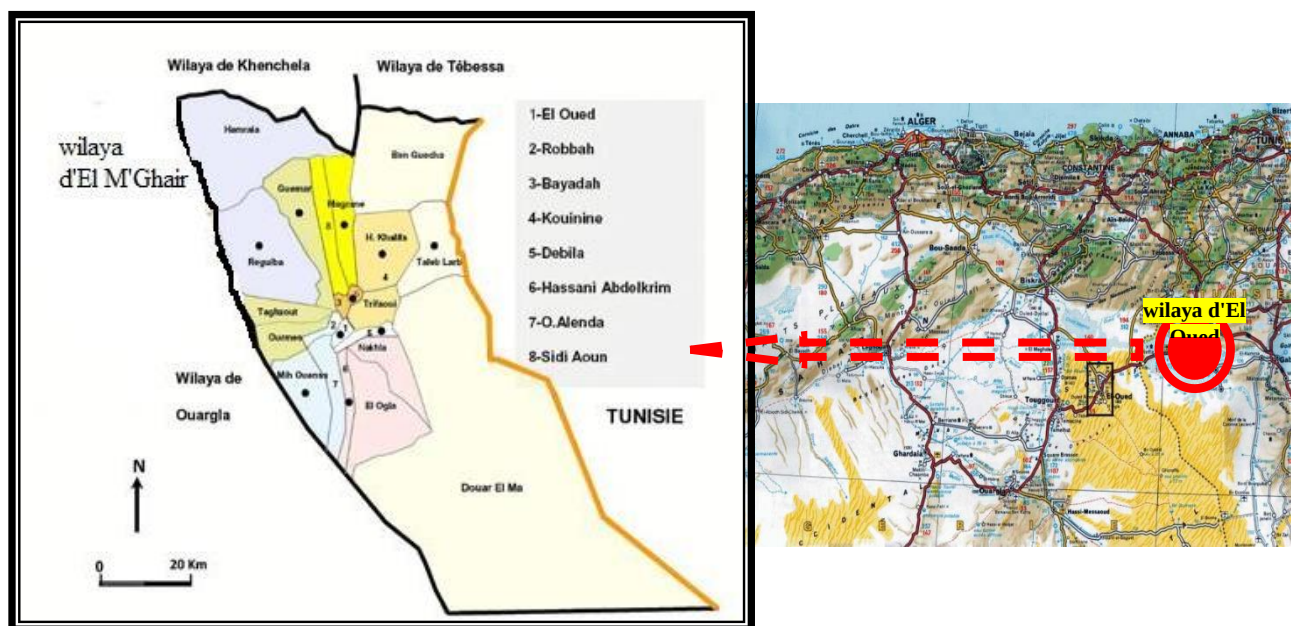


Figure 1 Situation géographique 'El-Oued 2023

La zone d'étude est délimitée par les coordonnées suivantes : (UTM Clarke 1880, zone 32):

Longitudes : $X1 = 275' 200$ - $X2 = 322' 000$ Latitudes : $Y1 = 3'665' 000$ - $Y2 = 3'743' 000$

I.2 Cadre social et économique de Souf:

Les manifestations de la vie quotidienne traduisent un système d'organisation qui tient compte des possibilités économiques, de la vocation agricole, commerciale et artisanale.

Si nous voyons successivement les principales activités, nous donnons un aperçu général sur l'économie du Souf.

Celles-ci s'articulent autour de l'agriculture, qui sera étudiée en premier lieu et les activités des transformations et commerciales qui sont traitées par la suite:

I.2.1 L'artisanat:

El Oued à toujours était un centre artisanal, notamment pour les objets liés à l'ancienne technologie de l'agriculture. On note les activités artisanales, il s'agit des tailleurs, des tapissiers, des maçons, des cordonniers, des menuisiers, des bijoutiers, des forgerons.

I.2.2 Le commerce:

Tout soufi est commerçant dans l'âme, la ville d'el Oued compte 7000 registres de commerces, et 10000 l'ensemble du souf. Grâce à la position géographique entre trois Etats (Algérie, Tunisie, Libye), le souf a acquis une position stratégique exceptionnelle, on peut dire que la ville d'El Oued est un centre d'échange commercial, très actif, ainsi elle constitue le centre d'achat de toute la région du souf d'où l'importance de son marché.

Cette activité commerciale se traduit également par le grand axe commerçant qui, sur plus de 15km, s'allonge le long de la Route Nationale de Kouinine-Robbah où la densité commerciale y est forte au centre 15 à 20 établissements pour 100 m pour décroître vers les extrémités 4 à 5.

I.2.3 L'industrie:

Dans la foulée du commerce, un phénomène tout nouveau est apparu au Souf: l'industrie, depuis la décennie 1980, de petites unités privées se sont montées. Une spécialité est apparue, celle des parfums et cosmétique. Au domaine cosmétique sont venues s'ajouter 3 autres branches d'activité: l'agro-alimentaire, les plastique, les matériaux de construction, les boissons. Au total, aujourd'hui plus de 1600 personnes travaillent dans l'industrie.

Bref inventaire des unités industrielles du Souf :

- ✓ Parfums et cosmétique 20 unités ;
- ✓ Transformation du plastique 15 unités ;
- ✓ Fabrication carrelage 7 unités ;
- ✓ Transformation aluminium 6 unités ;
- ✓ Insecticides et détergents 4 unités ;
- ✓ Semoulerie, pâtes alimentaire 3 unités ;
- ✓ Unité déminéralisation eau 2 unités ;
- ✓ Unité de fabrication de peinture 1 unité ;
- ✓ Unité de fabrication des boissons 1 unité ;

I.2.4 L'agriculture:

L'agriculture est la principale activité de la région pour l'homme du souf comme culture dominante, la Pomme de terre, le tabac (Guémar), le palmier dattier dans les ghouts.

Les ghouts saharienne fonctionne comme un agro-système, reposant sur la trilogie eau/habitat/palmeraie; pour faire venir les eaux à eux, les soufis ont imaginé d'aller à elle, d'excaver suffisamment le sable pour que l'épaisseur restante soit 2m, planter alors les palmiers dans sol de façon à ce qu'ils aillent puiser l'eau par leur propre

racine, c'est le principe de la culture Bour (en sec), on n'importe pas d'eau d'irrigation mais le palmiers va chercher lui-même ce dont il a besoin.

Les limites de ces ghouts atteignent la frontière libyenne au sud et voisinent avec les Monts des Nemamchas, suivant une ligne passant par Negrine, s'étire à l'est à la frontière tunisienne et à l'ouest par l'immense oasis d'Oued Righ.

La Wilaya d'El Oued dispose d'une superficie agricole totale égale à 1591869 hectares mais la superficie réellement exploitée est 51437 hectares, la superficie irriguée est égale à 49982hectares. (DSA : Direction de Service Agricole d'El-Oued en 2010).

I.2.4.1 Possibilités d'extension :

La mise en valeur en irrigué dans la région d'Oued Souf est possible le long de la frontière Algéro-Tunisienne, qui ne présente pas actuellement de problèmes particuliers d'aménagement. Quant à l'extension où à la création de zones mise en valeur dans la vallée du Souf, il est à déconseiller

Dans l'immédiat, car l'irrigation par les nappes du CT et du CI ne font qu'aggraver la situation de la nappe phréatique, mais il est recommandé d'utiliser cette dernière pour l'irrigation de nouvelles parcelles. L'utilisation des eaux de cette nappe pour l'agriculture permettra de rabattre le plan d'eau, qui est actuellement proche de la surface du sol.

I.2.4.2 L'élevage:

Les animaux domestiques les plus élevés sont: les chèvres, les ovins, les chameaux, les chevaux, les mulets, les ânes les poulets, les pigeons.

Tableau 1: Résumé des résultats obtenus

Souf	Population (Hab)	Superficie (Km²)	Densité Hab/Km²	Superficie Agricole Km²
Total	679064	44586	15.23	15918.69

I.2.4.3 Situation Topographique**I.2.4.3.1 Nature topographique de la région d'étude :**

La région d'Oued- Souf appelée aussi région du Bas-Sahara à cause de la faible altitude est située au Sud-Est du pays- Le point le plus haut se trouve à la cote 125 m à la commune de Bayadha (Soualah), alors que le point le plus bas se trouve à la cote 29m à la commune de Réguiba (Foulia).

L'altitude moyenne de la région est de 80 mètres et accuse une diminution notable du Sud vers le Nord pour être de 25 mètres au-dessous du niveau de la mer dans la zone des Chotts qui occupent le fond de l'immense bassin du bas Sahara.

I.2.4.3.2 Pente de terrain

Le pendage général de la zone d'étude est orienté Sud/Nord, avec une pente moyenne très faible (au mieux de l'ordre de 0,002 m/m à 0,003 m/m) et des incidents liés à la présence des dunes.

I.2.4.3.3 Relief :

Le relief est très accidenté et couvert de chaînes des dunes surtout la partie sud-ouest, atteignant 100m d'hauteur, et reposant sur une formation quaternaire de plusieurs dizaines de mètres de sable fin éolien, compact, homogène et uniforme avec l'existence d'un nombre important de cratères creusés par l'homme (Ghouts) et des acquêtes (vide entre les dunes : hounds).

Dans le sud du Souf, on rencontre des dunes immenses et bien différenciées, atteignant parfois 200m de hauteur; on les appelle les Ghroudes

I.2.4.4 Contexte Climatologique :

Dans cette étude, nous sommes appuyés sur les données de l'Office national de météorologie (1989-2017) enregistrées par la station météorologique de l'aéroport de Guemar, El-Oued.

I.2.4.4.1 Température :

Le climat désertique sec est connu pour des changements de température extrêmes entre la nuit et le jour, atteignant parfois 21°C à l'ombre. En hiver, la température descend à 3°C et monte à midi à 25°C à l'ombre. En été, la région connaît des températures élevées atteignant parfois 49°C à l'ombre. Le tableau suivant présente la température moyenne dans la région du Souf au cours de la période (1989-2017).

Tableau 2 Les températures moyennes mensuelles (ONM 1989-2017)

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	Tmoy
T(C°)	27,94	26,65	22,7	18,45	16,42	18,43	22,5	28,35	32,23	37,95	38,74	38,28	27,39

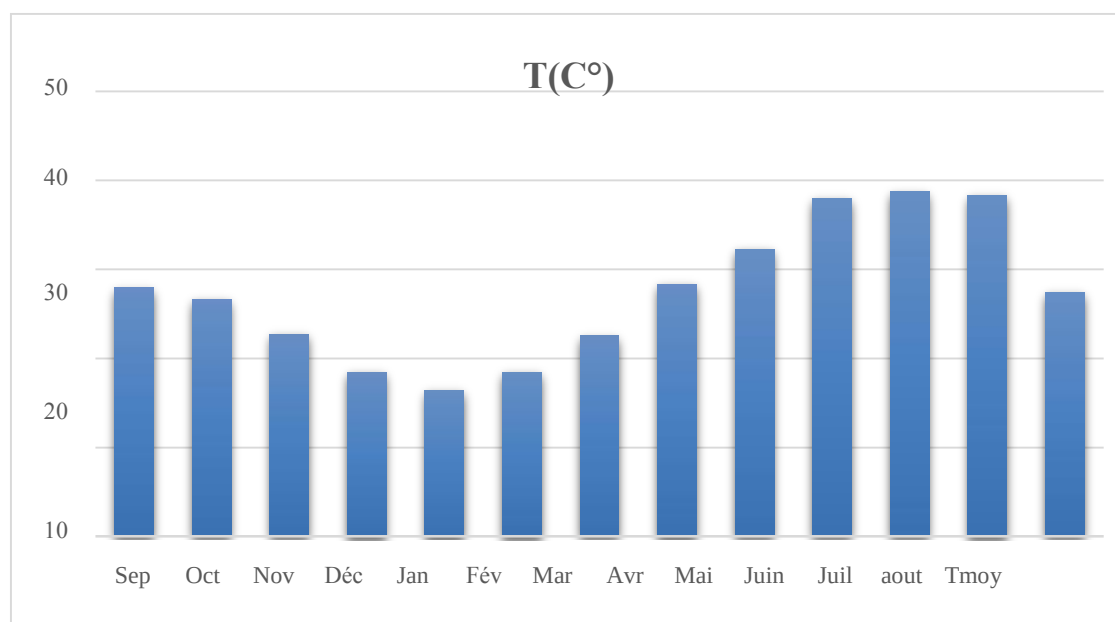


Figure 2 : Histogramme des températures moyennes mensuelles (ONM 1989-2017).

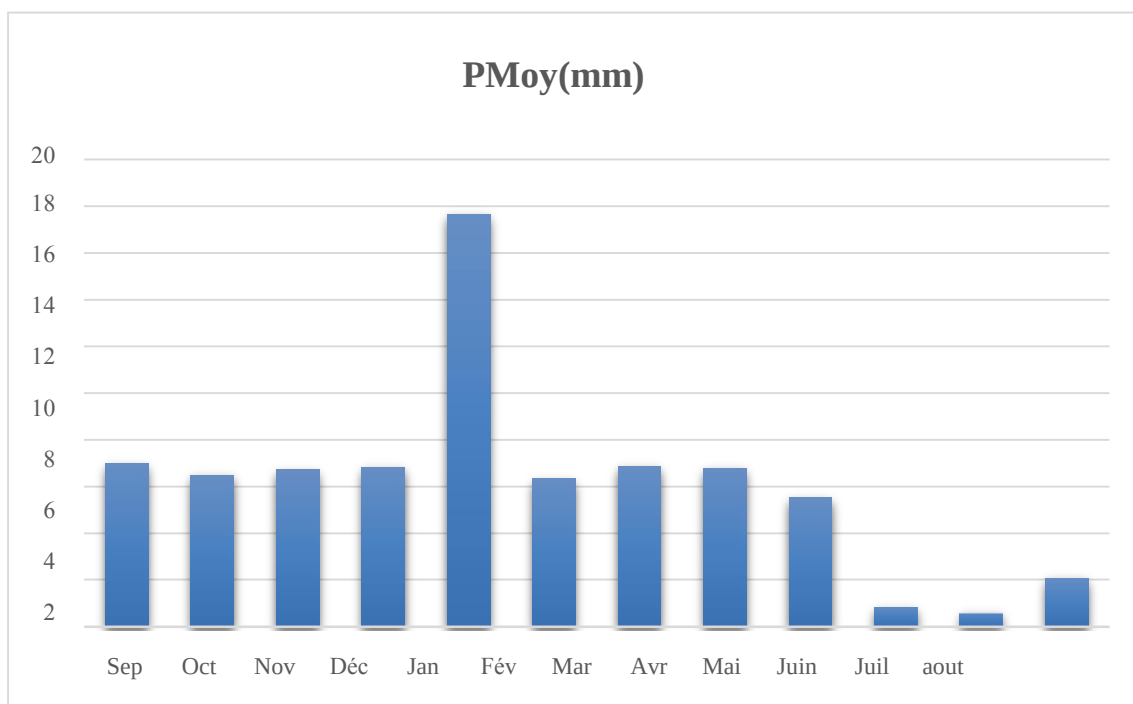
I.2.4.4.2 La précipitation :

Les dépressions de mousson en été, les eaux dépressions accompagnant la migration vers le sud des fronts polaires en hiver, et les bas niveaux du désert soudanais qui traversent notre désert du sud au nord pendant la période intermédiaire, sont les principales origines des précipitations dans les régions sahariennes. (Dubief 1963)

Tableau 3 Les précipitations moyennes mensuelles (ONM 1989-2017)

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout
P moy (mm)	6,96	6,46	6,7	6,8	17,64	6,32	6,83	6,76	5,51	0,81	0,36	2,07
P moy cum	73.22 mm											

On note que la pluviométrie est très faible, puisque le maximum a été en janvier (17,64 mm) et le plus bas en juillet (0,36 mm), ce qui explique la dépendance totale de la population aux eaux souterraines.

**Figure 3** : Histogramme précipitations moyennes mensuelles (mm) (ONM 1989-2017)

I.2.4.4.3 L'Humidité :

L'Histogramme (Figure 4) nous permet de distinguer les mois secs des mois humides. On note que les mois humides (HR > 49%) sont : octobre, novembre, décembre, janvier et février. Tandis que les mois secs sont les mois restants de l'année.

Tableau 4 : Humidité relative moyenne mensuelle (ONM 1989-2017)

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout
HR(%)	44,58	51,01	56,74	64,21	64,24	53,25	46,56	42,28	36,98	32,04	29,91	32,93

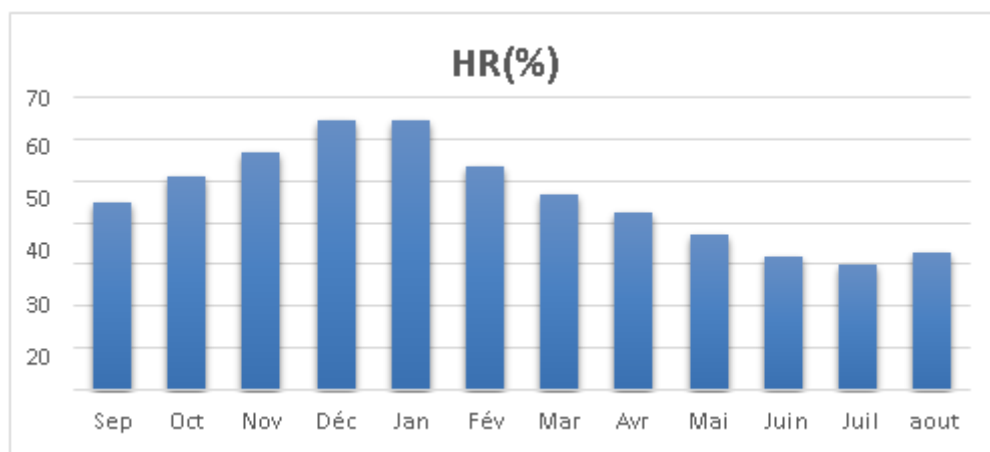


Figure 4: Variation mensuelles de l'humidité relative moyenne (ONM 1989-2017).

I.2.4.4.4 L'Evaporation :

On note que l'évaporation atteint sa valeur maximale en été, atteignant 28,56 mm en juillet, tandis que sa valeur la plus basse est de 6,97 mm en janvier, en raison de la nature de la région, caractérisée par des étés chauds et secs et des hivers froids.

Tableau 5: Evaporation moyenne mensuelle (mm) (ONM 1989-2017).

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout
Evap(mm)	13,56	10,87	9,76	8,03	6,97	11,43	15,82	19,47	23,03	26,87	28,56	19,43
Evap cum	193.8 mm											

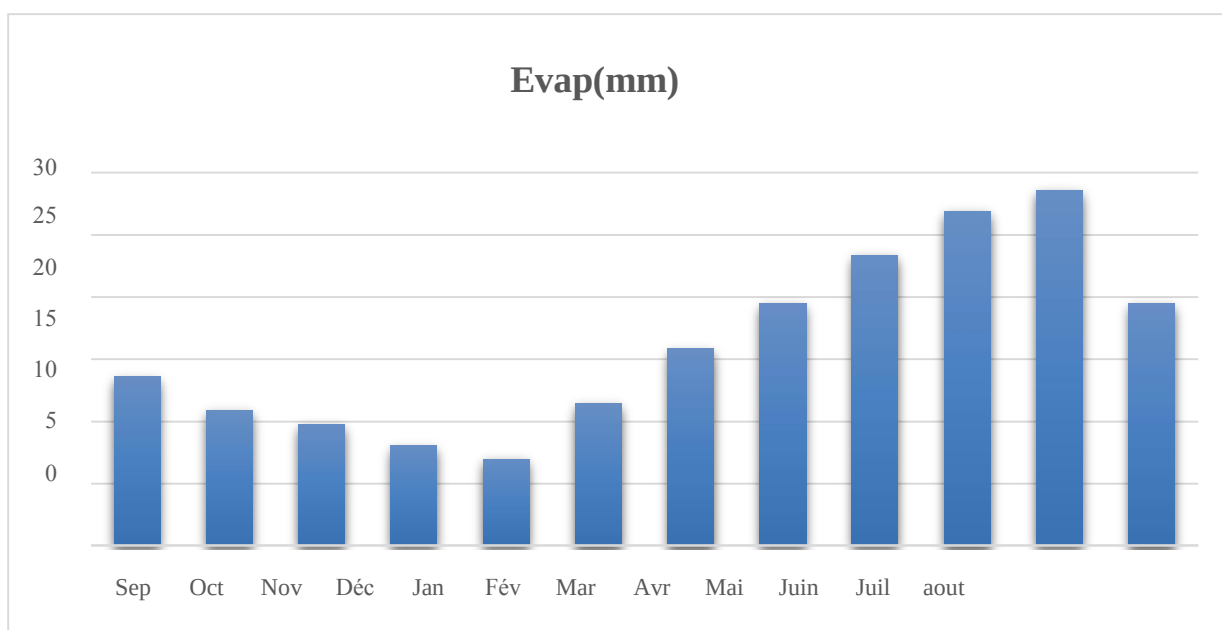


Figure 5: Variation mensuelle de l'Evaporation moyenne (mm) (ONM 1989-2017).

I.2.4.4.5 Le Vent :

On peut dire que la vitesse moyenne mensuelle du vent varie entre 1,68 et 3,83 m/s pour les mois de décembre et avril respectivement, avec une vitesse moyenne annuelle de 2,39m/s.

Tableau 6 : Vitesses du vent moyennes mensuelles (ONM 1989-2017).

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout
Vent(m/s)	2,45	1,78	1,45	1,68	1,83	2,91	2,34	3,83	3,57	2,23	2,07	2,49

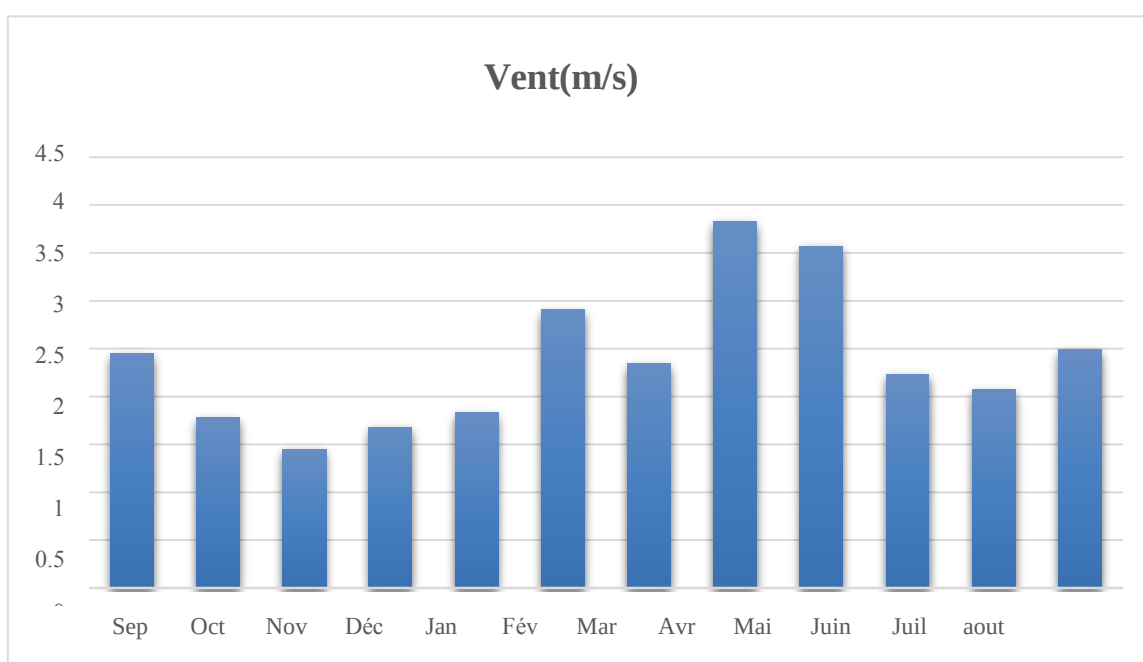


Figure 6: Histogramme des vitesses du vent moyennes mensuelles (m/s) (ONM 1989-2017).

I.2.4.4.6 La courbe pluviaux-thermique :

Suivant Gaussen et Bagnouls (in Rkiouak, 1996), un mois est dit sec lorsque $P < 2T$ avec P la Précipitation et T la température. La variation de ces deux paramètres au cours d'une année hydrologique moyenne est figurée sur le diagramme ombro-thermique (Figure 11). On en déduit que la période sèche est étendue pendant toute les deuze mois.

Tableau 7: données des précipitations et des températures moyennes mensuelles

(ONM 1989-2017)

Mois	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	Sep	Oct	Nov	Déc
Pmoy(mm)	17.64	6.32	6.83	6.76	5.51	0.81	0.36	2.07	6.96	6.46	6.7	6.8
2T(C°)	32.84	36.86	45	56.7	64.46	75.9	77.48	76.56	55.88	53.3	45.4	36.9

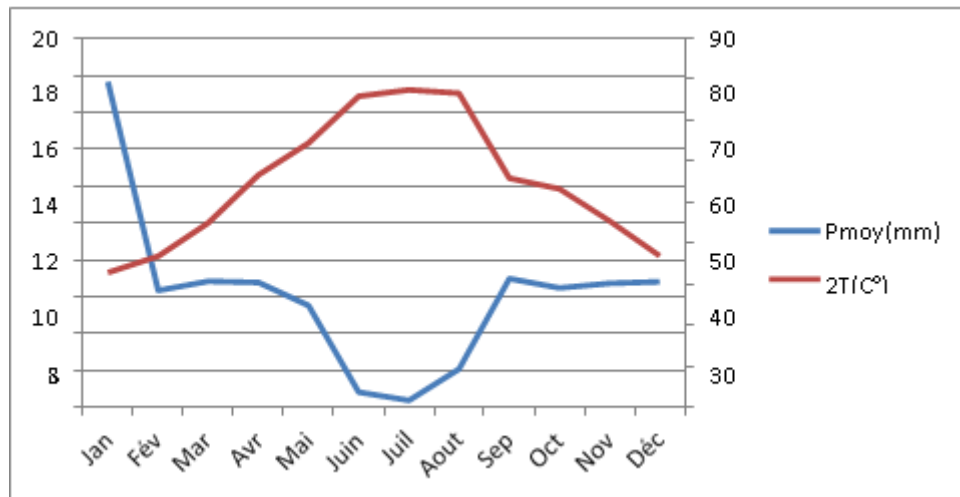


Figure 7: Diagramme Ombro-thermique d'El-Oued (ONM 1989-2017)

I.2.4.4.7 Le bilan hydrique :

$P = ETR + EX$ est la formule générale du bilan hydrique. Dans lequel :

P : Précipitation en (mm); ETR: la lame d'eau évaporée réellement en (mm). EX : Excédent ; $EX = R \times I$; R ruissellement ; I : infiltration.

Le Tableau suivant résume le calcul du bilan hydrique par la méthode de Thorntwaite.

Tableau 8: Bilan hydrique d'après Thorntwaite (ONM 1989-2017)

Mois	Tp	IT	CL	ETPC	Pr	BH	CH	VR	RU	ETPR	Def	Exc
S	27,94	13,53	1,03	88,55	6,96	-81,59	-0,92	0,00	0,00	6,96	81,59	0
O	26,65	12,60	0,97	72,03	6,46	-65,57	-0,91	0,00	0,00	6,46	65,57	0
N	22,70	9,88	0,86	38,85	6,70	-32,15	-0,83	0,00	0,00	6,70	32,15	0
D	18,45	7,22	0,81	19,25	6,80	-12,45	-0,65	0,00	0,00	6,80	12,45	0
J	16,42	6,05	0,87	14,41	17,64	3,23	0,22	3,23	3,23	14,41	0,00	0
F	18,43	7,21	0,85	20,14	6,32	-13,82	-0,69	-3,23	0,00	9,55	10,59	0
M	22,50	9,75	1,03	45,28	6,83	-38,45	-0,85	0,00	0,00	6,83	38,45	0
A	28,35	13,83	1,10	98,94	6,76	-92,18	-0,93	0,00	0,00	6,76	92,18	0
M	32,23	16,80	1,21	161,93	5,51	-156,42	-0,97	0,00	0,00	5,51	156,42	0
J	37,95	21,51	1,22	270,83	0,81	-270,02	-1,00	0,00	0,00	0,81	270,02	0
J	38,74	22,19	1,24	293,42	0,60	-292,82	-1,00	0,00	0,00	0,60	292,82	0
A	38,28	21,80	1,16	264,51	2,07	-262,44	-0,99	0,00	0,00	2,07	262,44	0
Annuel	27,39	162,37		1388,15	73,46	-1314,69				73,46	1314,69	0

Conclusion :

El' Oued c'est un coin de désert, un morceau de Sahara, sables, dunes, Oasis et palmiers.

On se trouve étonné de découvrir en ce coin de terre une population aussi importante, une vie aussi intense.

Le Souf a engendré des particularismes, à la conjonction d'un milieu physique particulier (Erg), et la ténacité d'une population, forme une société avec son histoire.

Une société constitue une vie particulière du monde saharien, faite de solide organisation sociétal, de forte pratique religieuse, des humains conviviaux.

La synthèse des données climatiques nous permet de dire que la région est caractérisée par un climat hyper-aride, caractérisé par une irrégularité pluviométrique annuelle et interannuelle.

Ce climat est caractérisé par l'existence de deux périodes différentes :

- ✓ L'une sèche et chaude, qui s'étale de mars à novembre et l'autre humide et froide pendant le reste de l'année.
- ✓ Le mois le plus humide est décembre, il est caractérisé par une forte humidité (environ 66.55%) et d'un faible rayonnement solaire (environ 225 heures). Le mois le plus sec est juillet, il est caractérisé par une faible humidité (32 % environ). La brillance du soleil est très élevée avec 352 heures, ce qui traduit un pouvoir évaporant excessif.

Chapitre II
Étude Géologique

II . Contexte géologique : Étude Géologique

Introduction

L'Algérie comprend quatre grands domaines géologiques du nord au sud:

- ✓ L'Atlas tellien (ou le Tell), constitué de reliefs escarpés et de plaines littorales dont les plus riches d'Algérie sont la Mitidja au centre, le Chelif à l'ouest et le Seybouse à l'est.
- ✓ Les Hauts Plateaux.
- ✓ L'Atlas saharien forme une longue suite de reliefs orientés SO-NE s'étendant de la frontière marocaine à celle de la Tunisie.

Le Sahara, qui recèle l'essentiel des ressources en hydrocarbures est un désert formé de grandes étendues de dunes (Erg Oriental et Erg Occidental), de plaines caillouteuses (regs) et parsemé d'oasis, qui sont autant de centres urbains comme El Oued, Ghardaïa et Djanet. Le massif des Eglab à l'ouest et le massif du Hoggar à l'est forment, pratiquement la limite méridionale du Sahara algérien.

II.1 Aspects Structuraux

L'Algérie est divisée en deux unités tectoniques majeures séparées par la faille sud-atlasique

- ✓ Le Nord de l'Algérie portant l'empreinte de la tectonique alpine.
- ✓ La plate-forme saharienne, relativement stable, où la tectonique est moins prononcée.

II.2 La plate-forme saharienne:

Elle est constituée d'un socle précambrien recouvert de sédiments phanérozoïques transgressifs.

Différents éléments tectoniques délimitent des bassins sédimentaires dans lesquels la lithostratigraphie est plus ou moins complète.

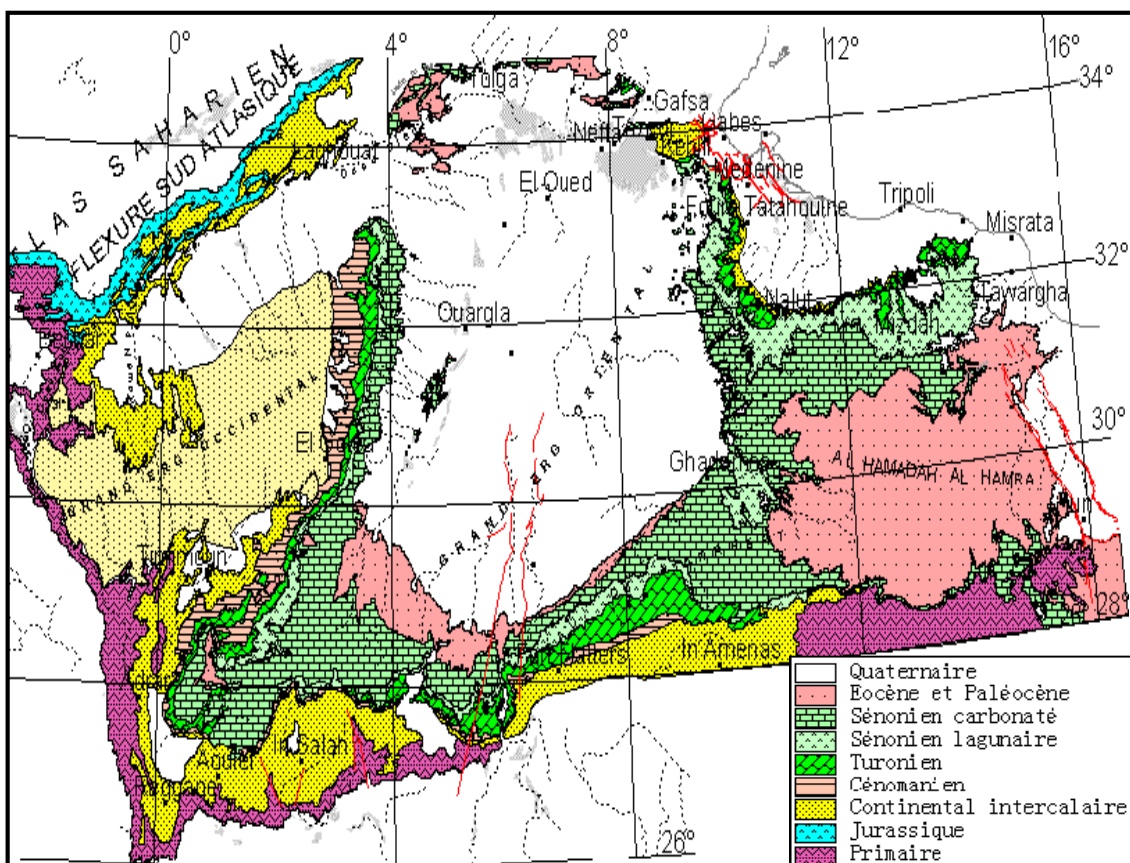


Figure 8: Plan Géologique de Grand Erg Oriental, (Baba Sy.M, 2005)

II.3 Structure géologique général:

À la base de l'édifice sédimentaire il y a des terrains paléozoïques marins contenant des niveaux aquifères salés et les gisements d'hydrocarbure au-dessus, et en discordance on rencontre des formations d'âge Secondaire et Tertiaire qui peuvent dépasser 3000 m de profondeur dans le centre du bassin (régions d'Ouargla, Touggourt, El Oued ainsi que sur la bordure des Aurès Ziban). Le Quaternaire représenté essentiellement par des sables dunaires, atteint parfois plusieurs dizaines de mètres d'épaisseur.

L'existence de sable éoliens dans les dunes provient essentiellement de l'érosion du Hoggar.

II.4 Cadre géologique de la région d'oued souf :

La région d'étude est située exactement dans la partie Nord-est de la plateforme saharienne cette région a fait l'objet de plusieurs études géologiques.

Ces études montrent l'existence d'un seul type de terrain sédimentaire caractérisé par des formations détritiques particulièrement sableuses, elles apparaissent sous forme de dunes et anti- dunes.

La géologie est un moyen d'investigation très utile en hydrogéologie car elle permet la détermination des horizons susceptibles d'être aquifères.

Le sous-sol de la région étant sableux et assurant l'infiltration et la circulation souterraines des eaux, est essentiellement représenté par des formations sablo-gréseuses du continental intercalaire, et des accumulations sableuses Fulvio-lacustres de tertiaire continental.

Sur l'ensemble de la région d'El-Oued, les formations moi-pliocènes sont recouvertes par une considérable épaisseur de dépôts quaternaires présentés sous forme de dunes donnant naissance à un immense erg qui lui-même fait partie de l'extension du grand erg oriental.

II.5 Stratigraphie régionale :

D'après (Cornet 1964, Bel 1968) et les coupes de sondages établies à partir des forages, les profondeurs des étages varient d'une région à l'autre.

Sur la base des logs de forage de l'Albien faite par l'ANRH (1993) sur la région d'Oued-Souf, nous pouvons citer les principales couches repérées dans cette région, en allant de la plus ancienne vers la plus récente (Figure 9).

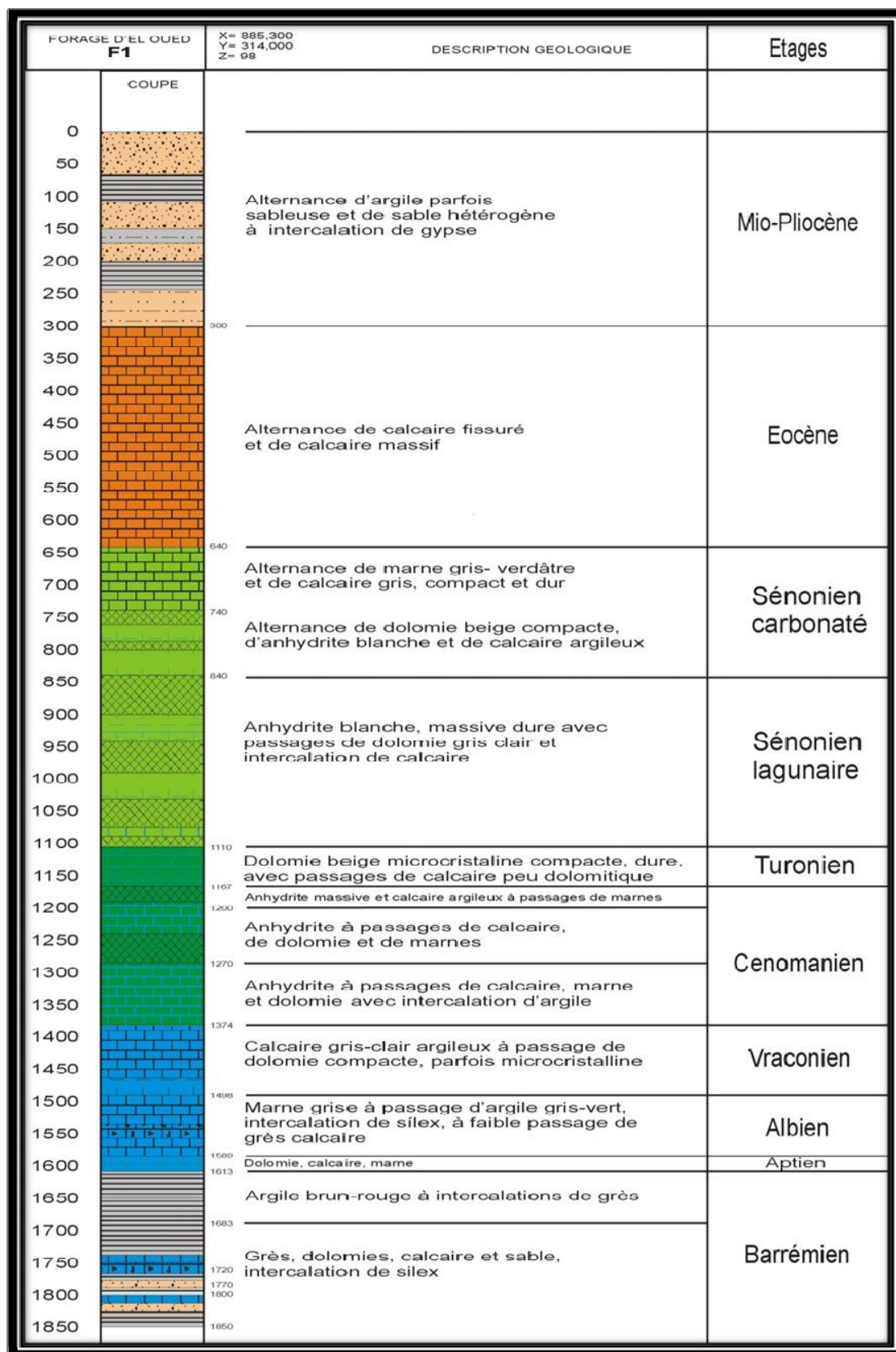


Figure 9: La colonne litho stratigraphique du forage F1, (ANRH, 1993).

II.6 Formations de l'ère Secondaire :

II.6.1 Le Barrémien :

Cet étage est capté par tout le forage du continental intercalaire réalisé dans cette région; il présente une lithologie d'alternance de grès avec passages d'argiles et parfois des intercalations de calcaire dolomitique, on rencontre également des sables avec présence de silex. L'épaisseur moyenne de cet étage est de l'ordre de 200 à 230 mètres.

II.6.1.1L'Aptien :

Comme le Barrémien, ce dernier est constitué principalement par des formations dolomitiques, marneuses et marno-calcaires. D'après les coupes géologiques des forages réalisés dans la région, l'Aptien est le seul étage dont l'épaisseur ne dépasse pas les 30 mètres.

II.6.1.2L'Albien :

Cet étage est constitué par une alternance de marnes, de grès de sables et par des calcaires avec passages de silex et d'argile.

La limite inférieure est constituée par le toit de la barre aptienne, alors que sa limite supérieure se caractérise par l'apparition des faciès argilo carbonatés. D'après les coupes de sondages des forages Albien, l'épaisseur de cet étage varie de 100 à 150 mètres; dans d'autres endroits elle peut atteindre 200 mètres.

II.6.1.3Le Vraconien :

C'est en fait, une zone de transition entre l'Albien sableux et le Cénomanién argilo carbonaté. Cet étage est constitué principalement d'une alternance irrégulière de niveaux argilo dolomitiques. On peut trouver aussi des argiles sableuses et de rares passées de grès à ciment calcaire.

Dans la zone d'étude, l'épaisseur de cet étage varie entre 250 et 300 mètres. En raison de l'importance de ses niveaux argileux, il constitue une importante couverture de l'Albien.

II.6.1.4 Le Cénomanién :

Tous les forages réalisés dans cette région ont montré que cet étage est constitué par une alternance de dolomies, de calcaires dolomitiques, de marnes dolomitiques, d'argiles et d'anhydrites. Cet étage joue le rôle d'un écran imperméable.

Quant aux limites de cet étage, on peut dire que la limite inférieure est caractérisée par l'apparition d'évaporites et de dolomies qui la distingue nettement, la limite supérieure caractérisée par l'apparition d'évaporites et de calcaires correspondants à la limite inférieure du Turonien.

II.6.1.5 Le Turonien :

Cet étage représente la base du complexe terminale. Il est généralement carbonaté et constitué par des calcaires dolomitiques et des dolomies micro cristallines compactes avec des intercalations de calcaires Turoniens et parfois de marnes.

Les forages de la région montrent clairement que son épaisseur varie d'un endroit à un autre, elle dépasse parfois 650 mètres.

II.6.1.6 Le Sénonien :

La plupart des études géologiques effectuées à travers le Sahara algérien montrent que le Sénonien est formé de deux ensembles très différents du point de vue faciès : l'un correspond au Sénonien lagunaire situé à la base et l'autre au Sénonien carbonaté au sommet.

II.6.1.6.1 Sénonien lagunaire :

La limite de ce sous étage est bien distinguée. Le Sénonien lagunaire est caractérisé par un faciès évaporé avec des argiles où ces derniers sont aisément différenciés de ceux du Turonien.

Il est constitué également d'anhydrites, de calcaires dolomitiques d'argiles et surtout les bancs de sel massif dont l'épaisseur avoisine 150 mètres. La limite supérieure de cette formation coïncide avec le toit de la dernière intercalation anhydride.

II.6.1.6.2 Le Sénonien carbonaté :

Ce second sous étage est constitué par des dolomies, des calcaires dolomitiques avec des intercalations marno argileuses et en grande partie par des calcaires fissurés. Son épaisseur dépasse parfois les 300 mètres.

Il faut mentionner par ailleurs l'existence d'une continuité lithologique entre le Sénonien carbonaté et l'Eocène, qui présentent des calcaires de même nature avec présence de nummulites.

II.6.2 Formation De L'ère Tertiaire :**II.6.2.1 L'Eocène:**

Il est formé par des sables et des argiles, parfois on rencontre des gypses et des graviers. Dans cette région, l'Eocène est carbonaté à sa base, sa partie supérieure est marquée par des argiles de type lagunaire. L'épaisseur de cet horizon varie entre 150 et 200 mètres.

II.6.2.2 Le Miopliocène :

Il repose en discordance indifféremment sur le Primaire d'une part et sur le Crétacé inférieur, le Turonien, le Cénomaniens et l'Eocène d'autre part, il appartient à l'ensemble appelé communément Complexe Terminale (C.T).

La plupart des coupes de sondages captant cet horizon, montrent que le Miopliocène est constitué par un empilement de niveaux alternativement sableux, sablo argileux avec des intercalations gypseuses et des passées de grès.

Sur toute l'étendue du Sahara oriental, Bel et Demargne séparent cet horizon en 4 niveaux:

II.6.2.2.1 Niveau argileux :

Il est peu épais et existe uniquement dans la zone centrale du Sahara oriental. Avec l'Eocène lagunaire, les argiles de la base du Miopliocène constituent une barrière peu perméable entre les nappes du Sénono-Eocène carbonatées et celle du Pontien sableux.

II.6.2.2.2 Niveau grès sableux :

C'est le plus intéressant sur le plan hydrogéologique, son épaisseur reste presque régulière sur toute l'étendue du Sahara oriental. A sa base, on trouve parfois des graviers alors que le sommet se charge progressivement d'argiles. C'est à ce niveau que se rattache le principal horizon aquifère du Complexe Terminal.

II.6.2.2.3 Niveau argileux :

Il ne présente pas un grand intérêt du point de vue hydrogéologique, ce niveau renferme des lentilles sableuses qui peuvent former le quatrième niveau (sableux) du Miopliocène.

II.6.2.2.4 Niveau sableux :

Ce niveau constitue le deuxième horizon aquifère du complexe terminal, du point de vue hydrogéologique, ces niveaux sableux présentent un grand intérêt car ils correspondent pour ainsi dire à la nappe des sables du Complexe Terminal.

II.6.3 Formation De L'ère Tertiaire :**II.6.3.1 L'Eocène:**

Il est formé par des sables et des argiles, parfois on rencontre des gypses et des graviers. Dans cette région, l'Eocène est carbonaté à sa base, sa partie supérieure est marquée par des argiles de type lagunaire. L'épaisseur de cet horizon varie entre 150 et 200 mètres.

II.6.3.2 Le Miopliocène :

Il repose en discordance indifféremment sur le Primaire d'une part et sur le Crétacé inférieur, le Turonien, le Cénomaniens et l'Eocène d'autre part, il appartient à l'ensemble appelé communément Complexe Terminale (C.T).

La plupart des coupes de sondages captant cet horizon, montrent que le Miopliocène est constitué par un empilement de niveaux alternativement sableux, sablo argileux avec des intercalations gypseuses et des passées de grès.

Sur toute l'étendue du Sahara oriental, Bel et Demargne séparent cet horizon en 4 niveaux:

II.6.3.2.1 Niveau argileux :

Il est peu épais et existe uniquement dans la zone centrale du Sahara oriental. Avec l'Eocène lagunaire, les argiles de la base du Miopliocène constituent une barrière peu perméable entre les nappes du Sénono-Eocène carbonatées et celle du Pontien sableux.

II.6.3.2.2 Niveau grès sableux :

C'est le plus intéressant sur le plan hydrogéologique, son épaisseur reste presque régulière sur toute l'étendue du Sahara oriental. A sa base, on trouve parfois des graviers alors que le sommet se charge progressivement d'argiles. C'est à ce niveau que se rattache le principal horizon aquifère du Complexe Terminal.

II.6.3.2.3 Niveau argileux :

Il ne présente pas un grand intérêt du point de vue hydrogéologique, ce niveau renferme des lentilles sableuses qui peuvent former le quatrième niveau (sableux) du Miopliocène.

II.6.3.2.4 Niveau sableux :

Ce niveau constitue le deuxième horizon aquifère du complexe terminal, du point de vue hydrogéologique, ces niveaux sableux présentent un grand intérêt car ils correspondent pour ainsi dire à la nappe des sables du Complexe Terminal.

II.6.4 Formation Du Quaternaire :

Elles se présentent sous forme des dunes de sable dont le dépôt se poursuit sans doute encore de nos jours. Les terrains quaternaires représentent la couverture superficielle qui se localise surtout au niveau des dépressions et couvrent la plus grande

extension au niveau du bas Sahara, ils sont formés d'un matériel alluvial et éolien d'où on trouve la formation des alluvions sableuses et argileuses.

Tableau 9: Les compositions lithologiques de la région d'étude

Ere		Système				Lithologie	Epaisseur Moyenne(m)
Cénozoïque	Quaternaire	Supérieur				Sables	54
		Inférieur				Argiles	150-260
	Tertiaire	Néogène (Moi-pliocène)		Pliocène	Plaisancien	Sables	150 – 200
					Tabianien	Argiles gypseuses	
				Miocène	Pontien	Sables grossiers; Graviers.	
		Paléogène	Oligocène			Argiles lagunaires ; marnes.	
			Eocène	Moyenne			
					Inférieure		Calcaire fissuré
			Paléocène	Vitrollien			
		Sec ondaire (Mésozoïque)	Crétacé		Supérieur	Sénonien	Carbonaté
Lagunaire	Evaporites, argiles						≈ 150
Moyenne	Turonien				Dolomie, passage de calcaire peu Dolomitique	≈ 650	
	Cénomanién				Argiles, marne	≈ 560	
inférieure	Vraconien				Calcaire argileux dolomie	250 - 300	
	Albien				Sables, Grés	100 – 200	
	Aptien				Dolomie, calcaire, marne	≤ 30	
	Barrémien				Grés, dolomie, calcaire, sable, silex	200 – 230	
	Néocomien				Argiles sableuses, Sables		

(D'après DHW , 2005)

Chapitre III
Hydrogéologie

III . Hydrogéologie

Introduction

Les études hydrogéologiques permettent d'identifier différents aquifères, leurs Géométrie, évolution des niveaux d'eau piézométriques, sens d'écoulement de l'eau. Cela nous fait prendre conscience :

- Carte du socle rocheux de l'aquifère.
- Profils hydrogéologiques généraux, régionaux et locaux.
- Diagramme manométrique du sens d'écoulement de l'eau.

Le système aquifère du nord du Sahara couvre plus d'un million Afrique du Nord-Ouest Km² : Algérie environ 700 000 Km², 80 000 Km² en Tunisie et 250 000 Km² en Libye. Ce sont des sédiments continentaux où l'on peut effectivement distinguer deux aquifères, on va De bas en haut, CI et CT.

III.1 Cadre hydrogéologique général :

La zone d'étude fait partie du bassin sédimentaire septentrional saharien qui s'étend Il couvre une superficie de 780 000 kilomètres carrés.

Ce bassin, vaste zone d'étalement, forme une importante dépression topographique, sous laquelle s'étend un bassin squelettique en forme de ligne synchrone asymétrique.

La chaîne sédimentaire, au centre du cratère, est caractérisée par des événements tectoniques destructeurs majeurs.

Les dépressions des berges sont généralement faibles, à l'exception de la zone frontalière située au nord-est du bassin.

Celle-ci comprend, à sa base, les formations marines anciennes qui sont surmontées dépareillées par les formations continentales secondaires et tertiaires d'une épaisseur de plusieurs milliers de mètres. Le Quaternaire est derrière lui.

Il se compose principalement de dunes de sable pouvant atteindre quelques centaines de mètres d'épaisseur.

Seule la série supérieure présente un intérêt hydrogéologique certain allant du Crétacé au Quaternaire, elle constitue une alternance de grès, sables, sables argileux et d'argiles, de calcaires, dolomies et de marnes, ainsi que d'évaporites. Cette série comporte trois grands ensembles perméables auxquels correspondent trois grands systèmes aquifères phréatiques.

III.1.1 Présentation des aquifères dans la zone d'étude :

D'un point de vue hydrogéologique, la zone d'El-Oued est représentée par deux systèmes aquifères : le Complexe Terminal et le Continental Intercalaire. Les deux systèmes ont un aquifère libre appelé la nappe phréatique au-dessus d'eux.

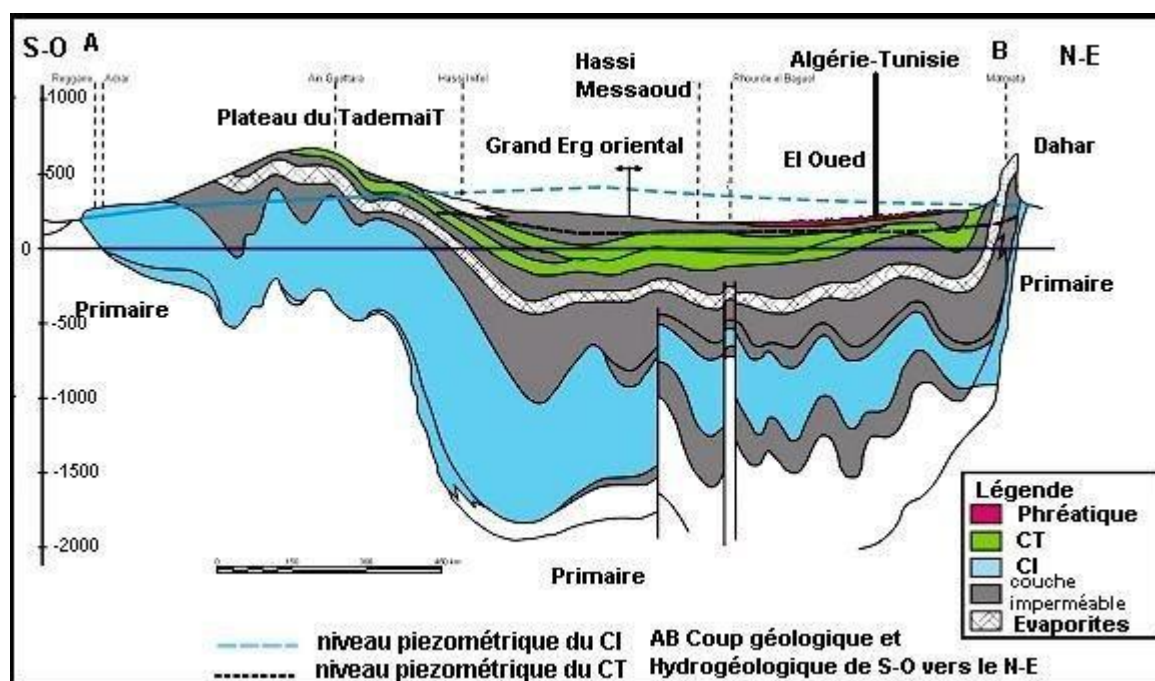


Figure 10: Coupe hydrogéologique à travers le Sahara (d'après UNESCO 1972).

III.1.2 Nappe phréatique :

PLINE dans son Histoire naturelle ancienne de 1855 notait ceci : à 12 jours de marche de la grande Syrte à l'ouest se trouvent des puits appartenant aux Ammanients, un peuple qui trouve facilement des sources à une profondeur de 2 coudées.

Cette nappe abondante est de plus en plus profonde vers le sud. Elle est à 7 ou 8 m à Guemmar, à 14 ou 15 à El-Oued et peut se trouver à 20 m de profondeur dans les villages au sud d'El-Oued.

L'eau de la nappe phréatique est omniprésente à Oued Souf. Il est situé sur le plancher de gypse dans le Pontien supérieur. La zone d'aération séparant la surface de ces eaux et la surface de la terre ne doit pas dépasser une distance verticale moyenne de plus de 40 m de sable non aqueux.

Selon Dubief 1947, l'approvisionnement de cet aquifère, qui n'est assuré que par infiltration, est à exclure car les pluies typiques du désert, même parfois généreuses, ne suffiraient jamais à elles seules à expliquer l'existence de telles eaux. Accumulation d'eau dans le sous-sol.

La nappe phréatique dans les sables des dunes du Quaternaire (zone saturée) a une épaisseur de quelques mètres (ex : 25 mètres à El-Oued).

Les études de leïèvre 1969, de Nesson 1978 et de Guendouz et al. 1992 montrent d'une manière générale, comme d'ailleurs dans tout le Bas-Sahara que le sens de l'écoulement des eaux de la nappe phréatique suit celui de la nappe du complexe Terminal, c'est-à-dire du sud vers le Nord.

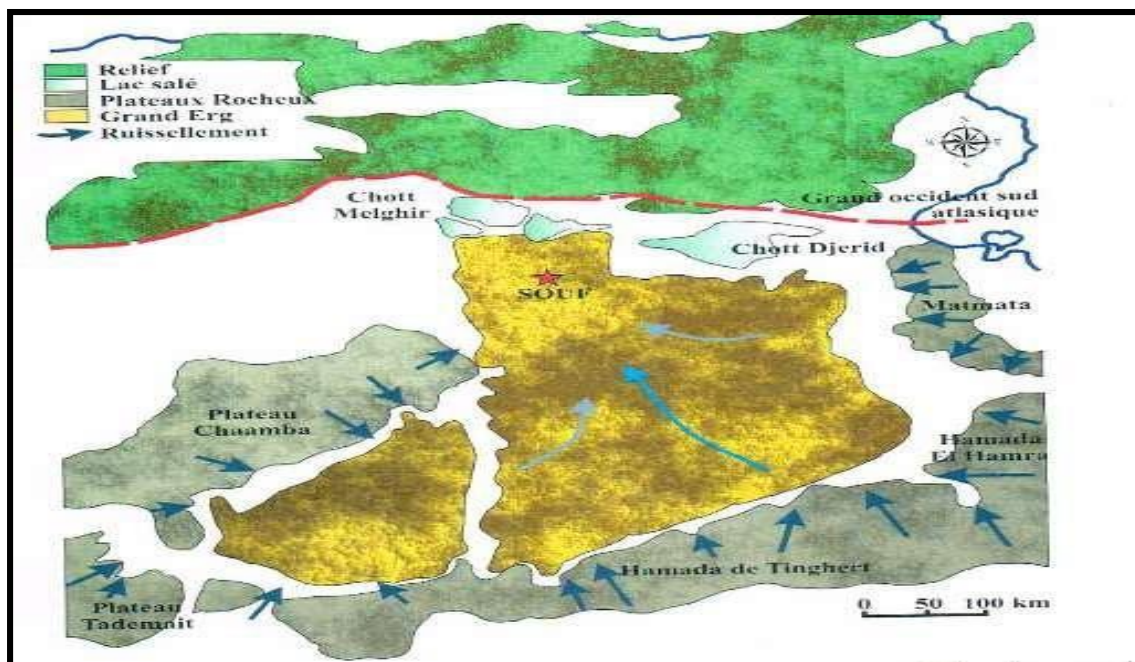


Figure 11: Zone d'alimentation de la nappe phréatique et le sens d'écoulement de la nappe (Cote Marc, 2006) Modifier par Hassani Nadhir.

III.1.3 Nappe Complexe Terminal :

Selon la définition de Kilian C 1931, le terme CT désigne la stratigraphie continentale, Sableuse et argileuse du Pliocène moyen. Mais selon BEL et DEMARGNE en 1966 : « La nappe du CT contenue dans les sables du Miopliocène est plus ou moins en relation avec les nappes de l'Eocène, du Sénonien et du Turonien, de sorte qu'à l'échelle de l'ensemble du Sahara, on peut considérer que ces différents niveaux forment une seule et même nappe, la nappe du CT, par opposition au CI ».

Avec le projet d'étude des ressources en eau du Nord du Sahara est apparu le concept de CT, un nom d'abord popularisé par BEL et CUCHE 1969 : Ce terme de nappe du CT qui regroupe sous le même nom de nombreux aquifères situés dans des formations géologiques différentes a été choisi parce que ces réservoirs font déjà partie du même système hydraulique. Les interconnexions entre Sénonien, Eocènes Miopliocène sont évidentes sur l'ensemble du bassin, à l'exception pour la région des Chotts où s'intercalent l'Éocène moyen et supérieur imperméable. L'aquifère Turonien est plus désigné en raison de la couverture étanche du Sénonien lagunaire. Cependant, ses niveaux sont en accord avec les niveaux de sénonien ou de Miopliocène au bord du bassin.

La zone qui compose le CT s'étend sur une superficie d'environ 350 000 kilomètres carrés en Algérie et en Tunisie, couvrant essentiellement la majeure partie du bassin oriental et tout le désert du nord, du Saoura à l'ouest jusqu'au flanc nord du plateau de Tademaït et Tinhert en Algérie, depuis Gargaf au nord du Fezzan, en Libye.

Ainsi son extension longitudinale est inférieure ou égale à celle de CI 1600 km, tandis que son élévation dans la direction nord-sud est inférieure à 600 km.

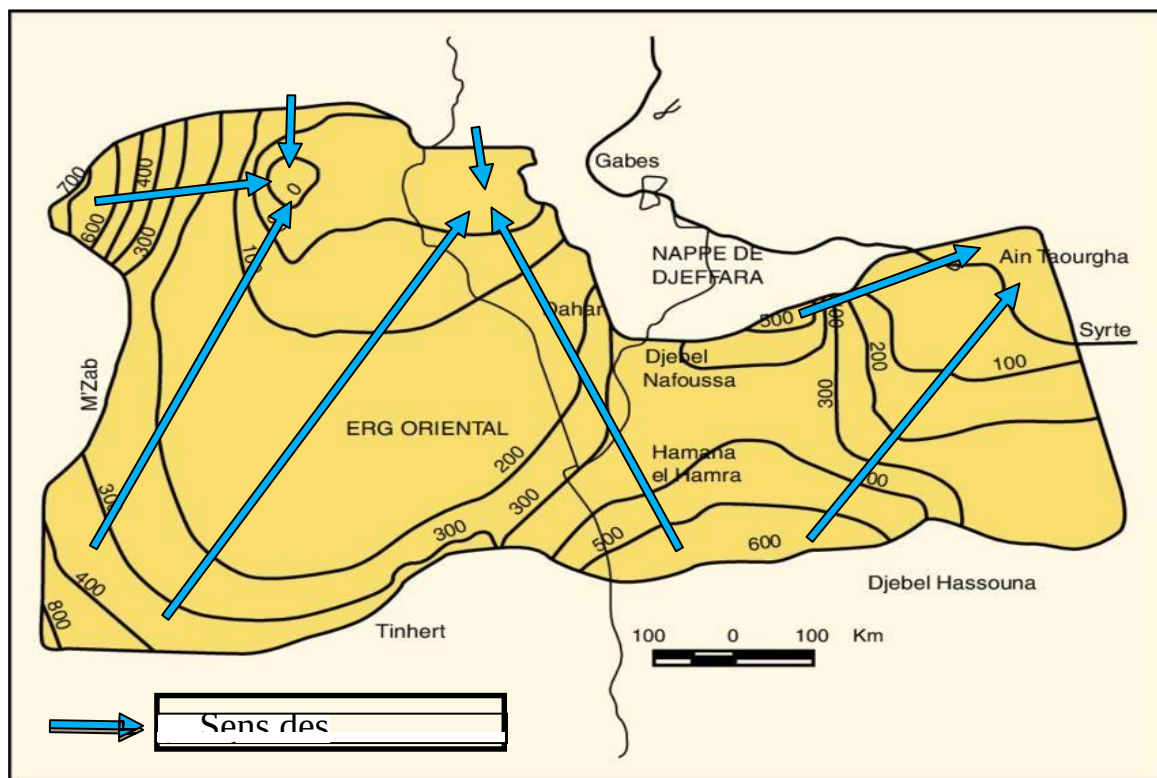


Figure 12: Piézométrie du Complexe Terminal (OSS, 2003).

III.1.3.1 L'exutoire du CT:

Dans le bassin occidental, l'écoulement se produit dans l'affleurement du piémont au sud (limite sud des zones d'affleurement du Grand Erg et du CI). A l'extrême ouest, une partie de ce ruisseau est coupée vers le fossé de la Saoura. Et à partir de la crête du M'Zab, tout le flux d'eau converge vers la ceinture des Chotts, c'est-à-dire Il change radicalement du sud au nord sous le Grand Erg Oriental. Dans le sud de la Tunisie et de la Libye, ce flux est dirigé vers le nord-ouest, puis vers Nord continue, la Libye a un fort gradient en raison de taux de transmission réduits réservoir.

III.1.3.2 L'exploitation de CT dans la région d'Oued Souf:

Le premier puits artésien semi-profond a été construit en 1953 à Seif El-Manadi (90 km au nord-ouest d'El-Oued), foré à une profondeur de 435 m, et a produit un débit estimé à environ 4 m³/m, permettant l'émergence de la première palmeraie irriguée.

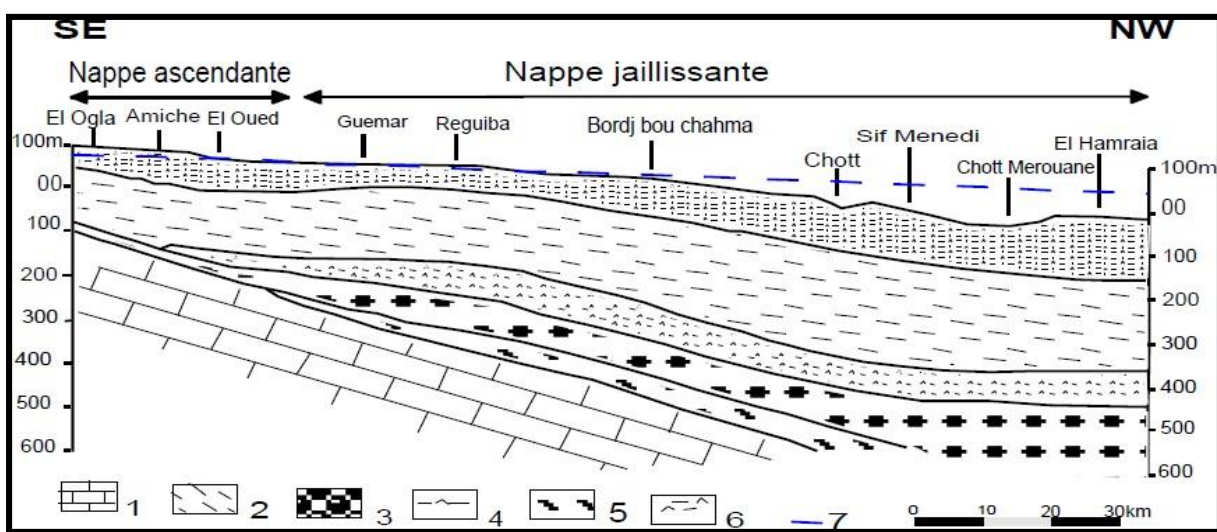
Dans la région d'Oued Souf, l'eau coule depuis le printemps 1956 d'un puits foré à El- Oued, à une profondeur d'environ 300 mètres ; Le débit est très faible (3,3 l/s) et la pression au sol est très faible +2,4 m.

Selon l'inventaire des puits de la DRH El-Oued, il existe actuellement 153 puits « CT » dans la zone du Souf ; 124 de ces puits sont destinés à l'approvisionnement en eau potable.

Quant au secteur agricole, il y a des investissements importants dans la région du Souf, qui a besoin de grandes quantités d'eau pour l'irrigation; A cet effet, la Direction des Ressources Hydriques d'El-Oued a alloué 29 puits d'irrigation.

Selon la « DRH » d'El-Oued, le débit exploité dans la Wilaya d'El-Oued à partir les nappes du CT est d'environ 18 m³/s, mais pour les communes de notre zone d'étude le débit utilisé n'excédait pas 4,5 m³/s.

Figure 13.. Figure 18: Coupe hydrogéologique d'El-Oued (A.N.R.H, 1989)



- 1- Calcaire de l'Eocène inférieur marin et de l'Eocène moyen évaporitique.
- 2- Argiles sableuses et marnes de la base du continental terminal.
- 3- Sable grossiers à graviers du Pontien inférieur.
- 4- Argiles et gypse dominants.
- 5- Argiles et sable dominants.
- 6- Argile sable et gypse (les trois derniers étages appartiennent au Mio-Pliocène supérieur).
- 7- Niveau hydrostatique de la nappe du Pontien inférieur.

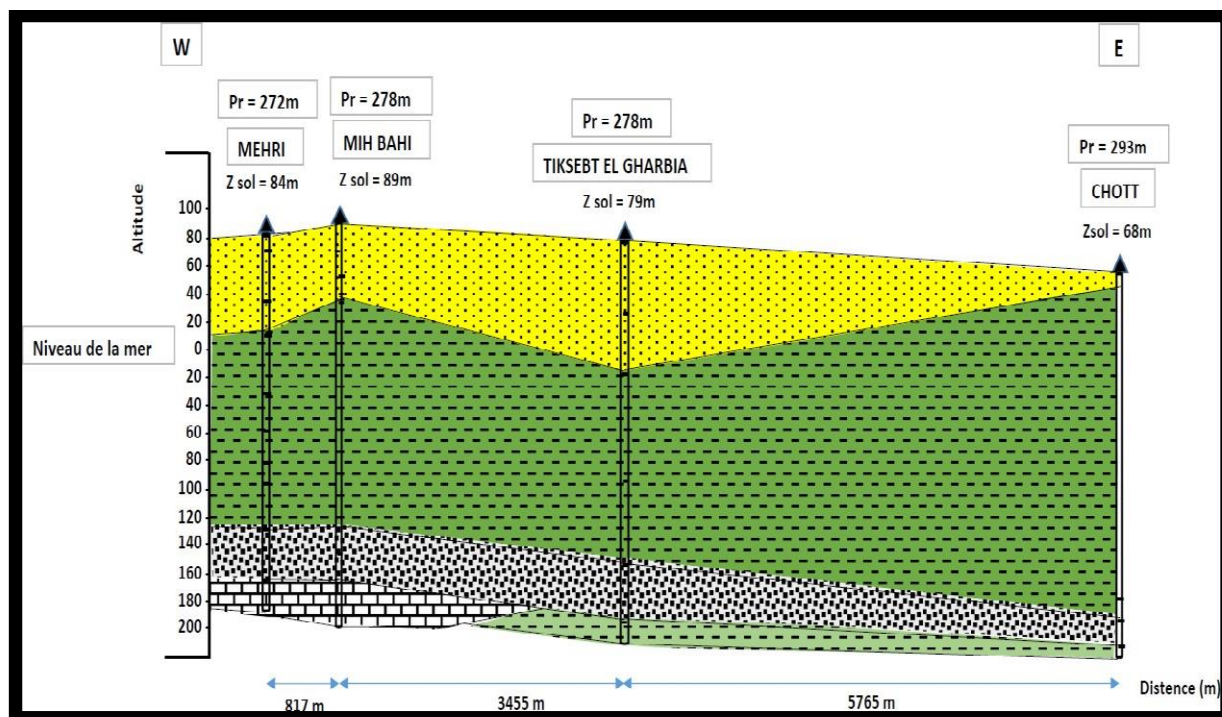


Figure 14: Coupe hydrogéologique d'El-Oued (A.N.R.H, 1989)

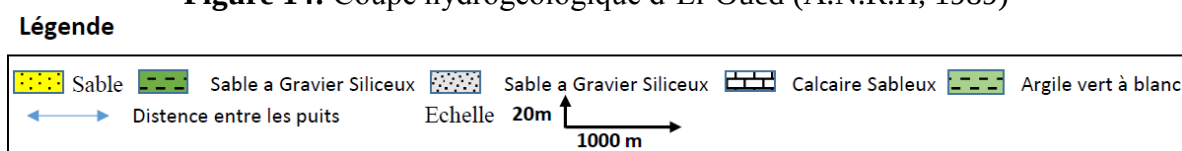


Figure 15: Coupe hydrogéologique de la zone d'étude en 2010

III.1.3.2.1 Nappes des sables :

Au sein de ces niveaux sableux, vient s'engendrer deux nappes captives, dont la première correspond à la formation supérieure du Complexe Terminal appelée communément réservoir du « Sub-Souf ». Cette nappe constituée de sables grossiers et faisant partie du Complexe Terminal mène progressivement vers le Nord du Sahara en direction de la fosse Sud aurésienne, dans la région d'étude elle se trouve à 280 mètres de profondeur.

Il convient également de noter qu'il existe une deuxième nappe de sable d'âge pontien au-dessus des bancs supérieurs de la nappe calcaire en contact avec les marnes de l'Éocène inférieur et les graviers siliceux, formant une deuxième nappe captive en continuité avec la nappe du Pontien du sud Tunisien, cette nappe est entre 400 et 450 mètres de profondeur. L'épaisseur utile de cette nappe est d'environ 50 mètres, les eaux

de ces deux derniers s'écoule du sud-ouest vers le nord-est, c'est-à-dire vers la région du chott (Malghir et Merouane).

Dans les zones fortement exploitées comme la ville d'El-Oued, l'eau est extraite par pompage. Par contre, dans les zones moins exploitées, Taleb El Arabi et Douar Elmaa par exemple, la nappe est actuellement exploitée de manière artisanale. C'est le cas de la nappe Pontienne.

III.1.3.2.2 Les nappes de calcaires :

Le complexe terminal a une litho-stratigraphie plus complexe ; Les puits qui captent cette nappe montrent la présence de deux niveaux qui servent de critère de classification des eaux souterraines ; Du sud au nord, On remarque que le premier niveau est calcaire, parfois c'est du calcaire pur, et d'autres fois il est constitué de calcaire gypseux, ce qui correspond au niveau inférieur. Le niveau supérieur, majoritairement représenté par du calcaire siliceux, sert de zone de transition entre la nappe calcaire et la nappe sableuse. En général, ces deux niveaux sont séparés par des formations tantôt marneuses, tantôt sableuses avec des couches d'argile rouge.

L'écoulement des eaux de la nappe du CT (**Figure 16**) s'oriente vers les chotts du Sahara Oriental ; Melghir et Merouane en Algérie, Rharsa et Djerid en Tunisie. Alors que dans le bassin occidental les eaux de la nappe se mélangent avec celles du Continental Intercalaire.

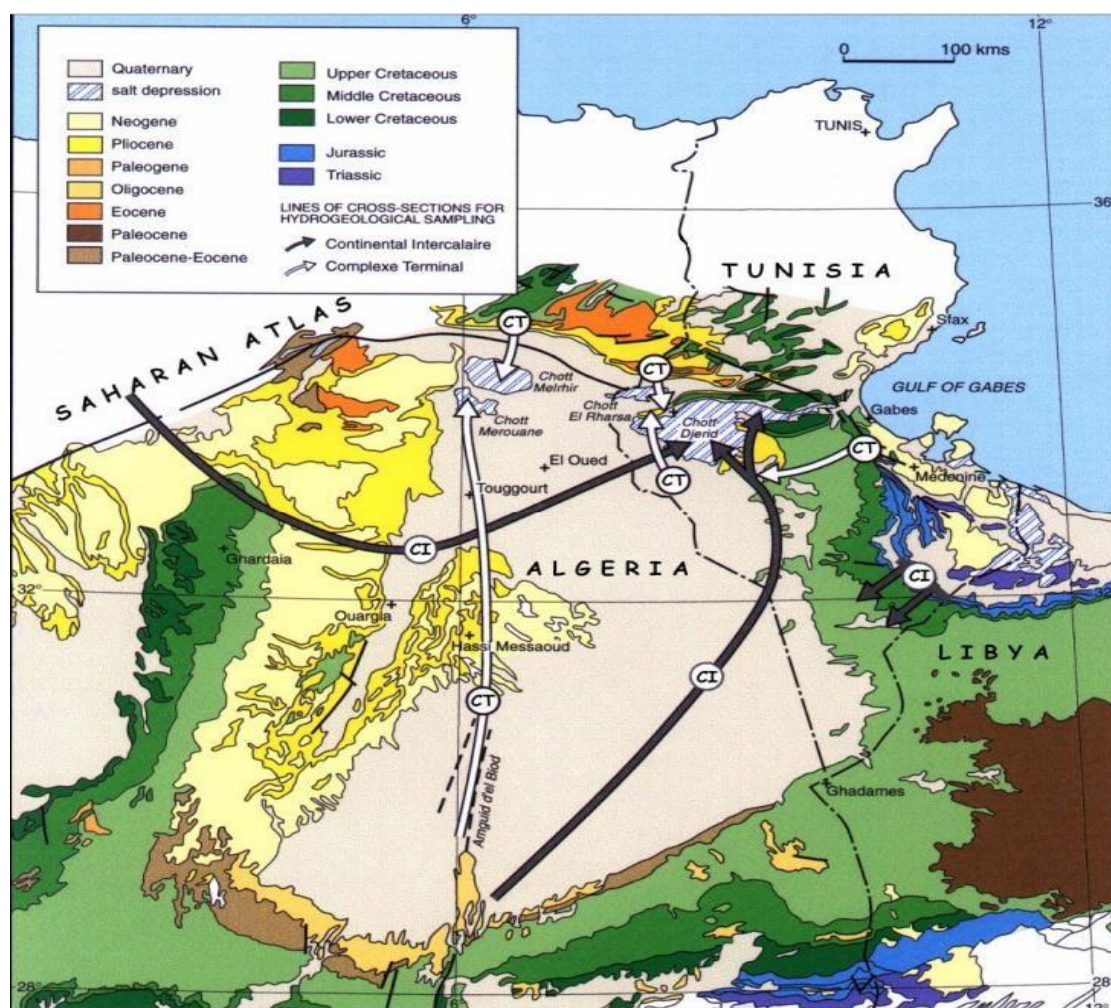


Figure 16: Le sens d'écoulement des aquifères CT et CI (UNESCO, 1972).

III.1.4 Nappe du Continental Intercalaire :

La nappe du CI, recouvert d'argiles et de carbonates du Cénomaniens, s'étend sur tout le bassin sédimentaire du Sahara septentrional, couvrant une superficie de plus de 600 000 kilomètres carrés.

Cet aquifère se trouve dans les formations continentales des horizons sablo-gréseuses et argilo-sableuses du Crétacé inférieur (Barrémien et Albien).

Les formations du CI s'étendent jusqu'au bord de la plate-forme, dans une auréole continue depuis El Goléa (Algérie) jusqu'à la limite sud de Hamra (Libye).

Dans la partie nord-ouest du bassin, le CI longe l'Atlas saharien et les contreforts de l'affleurement nord-est Les falaises de Dahar et Jebel Nefusa.

Plus au sud, CI se situe directement sur les formations marines paléozoïque, formée en Affleure une ceinture continue depuis la frontière marocaine à la limite nord-ouest du bassin, jusqu'à la ville des Hun (sud-est de la Libye).

III.1.4.1 L'exutoire du CI :

Le principal exutoire naturel de l'aquifère est situé en Tunisie. Il est constitué d'élévations verticales dues aux failles de la région de chott Fadjaj et grâce à l'écoulement vers l'aquifère tunisien de Geffara à travers les failles de Hamma et Médenine.

Les bordures ouest et sud du Tademaït forment également une importante zone d'exutoire naturel, qui était peut-être auparavant caractérisée par des sources dominées par le Faggaras.

L'eau non absorbée s'évapore dans un chapelet de sabkhas qui occupent le fond des dépressions de Gourara, Touat et Tidkelt.

De plus, il peut y avoir des transferts verticaux du Continental Intercalaire vers le Complexe Terminal grâce aux fractures qui caractérisent l'Amguid-El Biod.

Dans le reste du terrain, hormis la zone de contact potentiel avec le Complexe Terminal au Grand Erg Occidental, le toit de la formation, composé d'une épaisse couche d'argile et d'anhydrite, est totalement imperméable et isole complètement les deux réservoirs. Le Continental Intercalaire a d'abord été exploité, pendant plusieurs siècles, avec des débouchés industriels, à travers le système traditionnel des foggaras, introduit le long du plateau du Tademaït à partir du Xème siècle.

La formation du Continental Intercalaire est représentée par des dépôts continentaux sablo- gréseux et sablo-argileux du Crétacé Inférieur. C'est un système aquifère multicouche avec une profondeur locale de 2000 mètres et une force de 200 à 400 mètres. Aujourd'hui, dans toute la région du Souf, il existe quatre puits CI. Trois en production AEP et un nouveau puits au 19 mars avenue pour alimenter la station de dessalement.

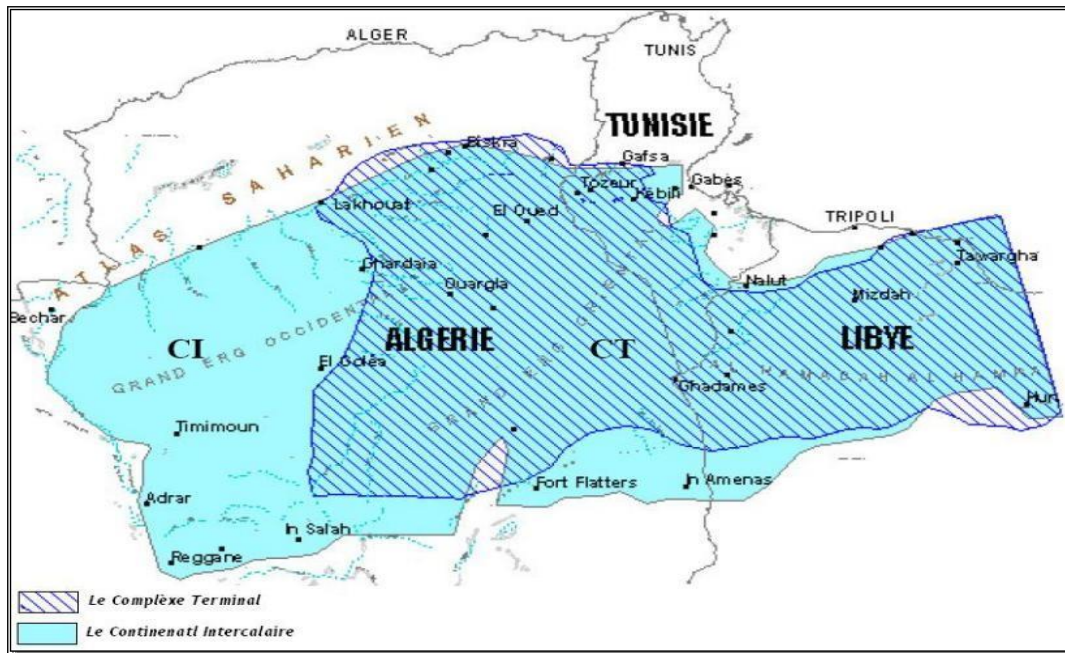


Figure 17: Situation géographique des deux nappes aquifères le Continental Intercalaire et le Complexe Terminal (UNESCO, 1972)

III.1.4.2 Estimation des réserves :

Des études hydrogéologiques montrent que le Sahara Algérienne possède d'énormes réserves d'eau souterraine, constituées de grès d'une porosité de 25%, et la superficie du bassin est de 600 mille kilomètres carrés, une étude de l'UNESCO (1972) estime approximativement la réserve d'eau moyenne pour tous les aquifères CI et CT à $60000 \times 10^9 \text{ m}^3$. Margat (1992), sans détail exact de la méthode de calcul, indique $40\,000 \times 10^9 \text{ m}^3$ de la réserve aquifère du CI. Il évalue la réserve du CT (couvrant $350\,000 \text{ km}^2$) à $20000 \times 10^9 \text{ m}^3$, ici, nous essayons d'évaluer les ressources dans les aquifères du Sahara septentrional sous la région du Souf. Les réserves totales du réservoir représentent le volume total des formations aquifères auxquelles la porosité efficace est appliquée (OSS 2002).

Tableau 10: Épaisseur moyenne des différents aquifères et estimation de la réserve
(UNESCO 1972)

Aquifère	Nappe phréatique	CT	CI
Epaisseur mouillée (m)	45	342	385
Superficies Mm²	11738		
Porosité efficace ne	12.49×10^{-2}	5×10^{-2}	5×10^{-2}
Reserve (x10⁹ m³)	65.97	200	226

L'estimation des réserves, nappe phréatique, CT et CI est devenue possible après avoir connu l'épaisseur moyenne de chaque réservoir, le volume utile ou réserve est calculé par la formule:

$$V = e \times s \times ne$$

Où e : épaisseur moyenne ; s : surface ne : porosité effective.

Selon les études menées par l'ANRH pour mieux connaître les aquifères du Sahara septentrional, ces études ont permis d'obtenir une estimation de l'épaisseur moyenne de chaque aquifère.

Tableau 11: Récapitulatif des systèmes aquifères d'El-Oued (D'après DRH 2005).

Nature Hydrogéologique		Nature Lithologique	Etage		Ere
Nappe phréatique		Sables	Quaternaire		
Niveau imperméable		Argiles			
1 ^{er} nappe des Sables	Complexe Terminal	Sables	Pliocène		Tertiaire
Semi-perméable		Argile gypseuses			
2 ^{eme} nappe des Sables		Sables grossiers, Gravier	Pontien	Miocène	
Niveau Imperméable		Argiles lagunaires,Marnes	Moyen	Eocène	
Nappe des calcaires (perméable)		Calcaire fissuré	Inférieur		
			Sénonien carbonaté	crétacé	
Semi-perméable	Evaporites, argiles	Sénonien lagunaire			
Niveau imperméable	Argiles, marne	Cénomanien			
Nappe de CI	Sables et Grés	Albien			

Chapitre IV

Les méthodes d'interpolation spatiale

IV . Les méthodes d'interpolation spatiale :

IV.1 Méthodes d'interpolation spatiale :

On distingue deux grandes classes : les méthodes déterministes et les méthodes probabilistes. Ces dernières se différencient par le concept du hasard et proposent des modèles probabilistes modélisant les erreurs aléatoires de prévision dans le but d'aider la prise des décisions lors des analyses des risques. Dans ce chapitre, on présente ces méthodes.

IV.1.1 Méthodes déterministes :

L'idée de base des méthodes déterministes est fondée sur l'observation suivante : les valeurs les plus proches les unes des autres doivent se ressembler plus et par conséquent reçoivent un poids important lors de la modélisation (Figure II.1) présente un résumé des principales méthodes déterministes.

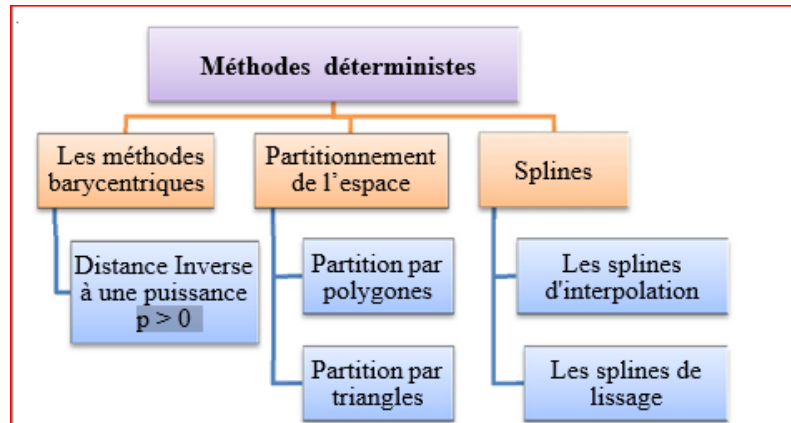


Figure 18: Résumé des méthodes d'interpolation déterministes

IV.1.1.1 Méthodes barycentriques :

Les méthodes barycentriques, dans d'autres versions on cite les moyennes mobiles (Ripley B.D 1981) ou encore l'approximation de Kernel (Christakos, 2001), sont très intuitives ; elles estiment la valeur inconnue z située S_0 par une simple moyenne pondérée des autres valeurs connues :

$$\hat{z}(s_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i z(s_i)$$

Avec n est le nombre de données primaires, λ_i sont les poids qui dépendent de la distance euclidienne $h = \|s_i - s_0\|$ entre la position de la valeur observée $Z(s_i)$ et la valeur à estimer $\hat{z}(s_0)$. Plus on s'éloigne de la valeur à estimer, plus le poids λ_i diminue. Un cas particulier se présente pour calculer les λ_i la méthode de l'inverse de distance à une puissance $p > 0$. On peut exprimer $\hat{z}(s_0)$ comme une combinaison linéaire de plusieurs observations environnantes avec des poids inversement proportionnels au carré de la distance (Goovaerts, 2000b).

IV.1.1.2 Méthodes d'interpolation par partitionnement de l'espace :

Ces méthodes diffèrent des autres méthodes déterministes par l'utilisation d'une partition de l'espace lors de la détermination des poids λ_i ainsi que le nombre nécessaire de mesures voisines du point estimé. Comme son nom l'indique, on doit positionner tout d'abord les points cibles (les mesures expérimentales) dans l'espace, puis réaliser l'interpolation spatiale. Pour le positionnement des points, il existe deux types de partitions d'échantillon en régions juxtaposées : une partition par polygones ou par triangles (Baillargeon, 2005).

Dans le premier cas, on définit un polygone pour chaque observation (mesure expérimentale) de façon que chaque point inclus, soit le plus proche du point de mesure que pour les autres polygones à côté. Une de ces méthodes est le partitionnement par polygone de Thiessen (Kergreis et Claude, 1991). Elle permet d'évaluer des moyennes spatiales sur un domaine à partir d'informations ponctuelles. La valeur de l'observation la plus proche est affectée au polygone défini par le vecteur s_0 :

$$\hat{z}(s_0) = z(s_\alpha) \text{ avec } |s_0 - s_\beta| < |s_0 - s_\alpha| \text{ Quel que soit } \alpha \neq \beta$$

En revanche, pour le deuxième cas, on aura une partition par triangulation où on découpe l'échantillon sous forme de triangles dont les sommets sont des points de

mesure. Il suffit donc de relier le point de la mesure à estimer par les trois sommets du triangle qui le contient. Ensuite, le triangle principal est divisé en trois petits triangles. Comme on considère uniquement les valeurs mesurées qui interceptent le triangle de la valeur à estimer, le poids λ_i de chaque valeur mesurée est proportionnel à la surface d'intersection.

IV.1.1.3 Splines

Les Splines sont des fonctions qui minimisent l'énergie de flexion sous certaines contraintes d'ajustement (Dubrule, 1983). On distingue essentiellement deux types de Splines : les Splines d'interpolations qui obligent la courbe de passer par tous les points de mesures et les Splines de lissages qui passent à proximité de toutes les mesures sans être forcées de passer par tous ces points (Matheron, 1975). Les travaux de Hastie (Hastie, 1990) ont abouti à des fonctions qui permettent la représentation d'une Spline dans l'espace bidimensionnel tout en contrôlant le passage proximité des points des mesure de façon à minimiser la courbure. On note aussi l'existence de plusieurs variantes comme les splines multi-quadratiques de Hardy (Hardy, 1971) et les splines régularisées avec tension (Ripley B.D 1981). Finalement, on mentionne les splines la placiennes étudiées également par Hastie et qui utilisent des sous-modèles linéaires pour effectuer une interpolation spatiale multivariable.

IV.1.2 Méthodes probabilistes

L'utilisation des modèles probabilistes, pour décrire le comportement d'une variable aléatoire permet d'évaluer l'incertitude de la valeur estimée. Parmi les méthodes recensées en littérature, on cite la régression, le krigeage et les simulations stochastiques, comme la montre (Figure II.2).

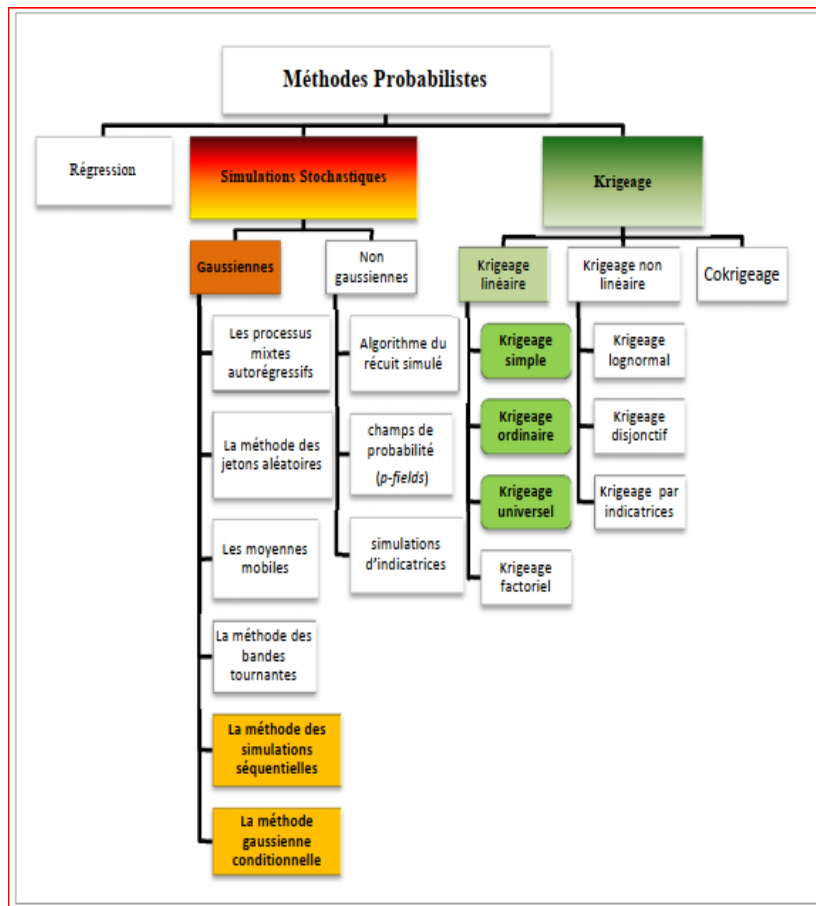


Figure 19: Les méthodes d'interpolation probabiliste

IV.1.3 Krigeage :

Le krigeage est une méthode d'interpolation spatiale qui prend en compte la structure de dépendance spatiale des données. Le krigeage se caractérise par une interpolation tout en conservant une variance minimale. Les poids des coefficients de krigeage dépendent de la localisation des observations et surtout des structures de dépendance spatiale. La structure de la dépendance de la fonction aléatoire est déterminée à partir de l'étude Vario graphique travers le modèle du semi variogramme. Plusieurs types de krigeage ont été étudiés en littérature :

- Simple (KS)
- Ordinaire (KO)
- Universel

IV.1.3.1 Krigeage ordinaire (KO)

On a vu que le krigeage simple requiert la connaissance de la moyenne pour déterminer les poids de l'estimateur et pour estimer sa variance.

La résolution d'un système de krigeage ordinaire est un problème d'optimisation. On doit trouver les poids en minimisant l'erreur quadratique moyenne.

IV.1.3.2 Propriétés du krigeage.

Les principales propriétés et caractéristiques associées au krigeage sont :

- ✓ Linéaire, sans biais, à variance minimale, par construction.
- ✓ Interpolateur exact : si l'on estime un point connu, on retrouve la valeur connue.
- ✓ Présente un effet d'écran : les points les plus près reçoivent les poids les plus importants. Cet effet d'écran varie selon la configuration et selon le modèle de variogramme utilisé pour le krigeage. Plus, l'effet de pépité est important, moins il y a d'effet d'écran.
- ✓ Tient compte de la taille du champ à estimer et de la position des points entre eux.
- ✓ Par l'utilisation du variogramme, tient compte de la continuité du phénomène étudié (effet de pépité, anisotropie, etc.).

IV.1.4 Le Variogramme :

La géostatistique a des visées plus modestes. On veut estimer des paramètres statistiques à partir des données et non imposer un modèle à priori qui aurait toutes les chances de s'avérer inadéquat. Les paramètres que l'on cherchera à estimer ne sont pas la fonction de distribution conjointe, ni même la fonction de distribution variable (i.e. les v.a. considérées deux à deux) mais simplement les deux premiers moments (moyenne, variance, covariance) des v.a. prises deux à deux. On ne peut donc estimer les paramètres statistiques sans formuler certaines hypothèses. Ces hypothèses ont uniquement pour but de permettre l'estimation des paramètres statistiques de notre

modèle à partir des données. On les appelle hypothèses de stationnarité du second ordre ; elles visent essentiellement à "détacher" les deux premiers moments de localisations précises en permettant

des translations des emplacements x et $x+h$. La covariance (et le Variogramme) devienne donc des fonctions dépendant uniquement de la distance séparant les points d'observation et non plus de leur localisation exacte.

IV.1.4.1 Variogramme théorique :

Le variogramme théorique est défini comme :

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} \text{Var}[Z(x) - Z(x+h)] = \frac{1}{2} E [(Z(x) - Z(x+h))^2]$$

Cette fonction, habituellement croissante en fonction de h , synthétise beaucoup d'informations concernant le comportement conjoint des variables aléatoires et concernant "la continuité" de la minéralisation.

Ainsi, pour les modèles de variogramme montrant un seuil, on a (figure II.3.) :

A-Portée a : Distance où deux observations ne se ressemblent plus du tout en moyenne, elles ne sont plus liées (covariance nulle) linéairement. À cette distance, la valeur du variogramme correspond à la variance de la variable aléatoire.

B-Palier $\sigma^2 = C_0 + C$: Variance de la v.a. ($\text{Var}(Z(x))$) Écarts les plus grands, en moyenne entre deux v.a.

C- Effet de pépité : C_0 : Variation à très courte échelle, erreurs de localisation, erreurs d'analyse et précision analytique.

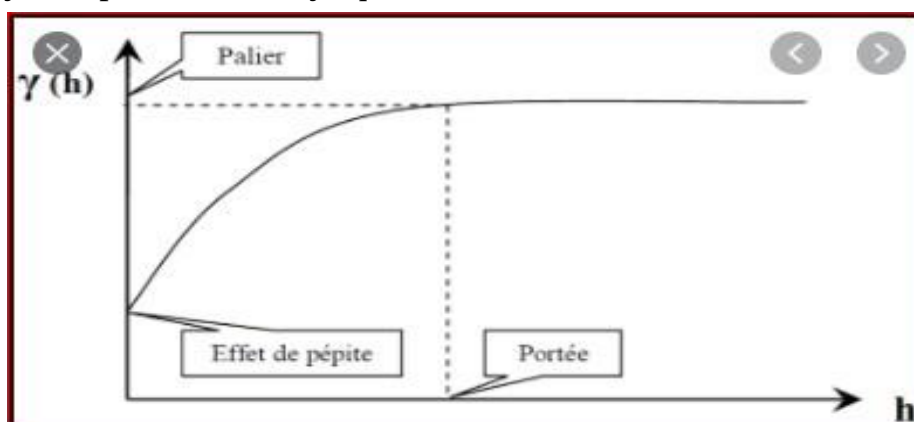


Figure 20: Schéma type d'un variogramme

IV.1.4.2 Le variogramme expérimentale :

Dans la pratique, il n'est pas possible de calculer le variogramme théorique tel qu'il est décrit, car on ne dispose que des échantillons. Pour l'approcher une expression du variogramme expérimental est plus pratique. Le variogramme permet de mesurer la variabilité à différentes échelles d'une variable régionalisée (x), en calculant la différence entre deux échantillons x_1 et x_2 situés deux points z_1 et z_2 d'un domaine spatial. Cette différence notée s s'écrit :

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_i^{N(h)} [(Z(x) - Z(x+h))^2]$$

Pour voir si l'azimut décrit par les deux points considérés a un effet quelconque, on fait dépendre de la distance et de l'orientation de la paire de points.

$$(\gamma_e) = \frac{(z_1 - z_2)}{2}$$

En formant la moyenne des dissemblances entre les valeurs pour toutes les $N(h)$ paires de points reliées par un vecteur h donné pour une maille donnée, on obtient la notion de variogramme expérimental.

$$\gamma_e = \frac{1}{2} (Z(x) - Z(x+h))^2$$

Où : $N(h)$ représente le nombre de paires d'observations séparées par la distance h . (Graphique II.4.) :

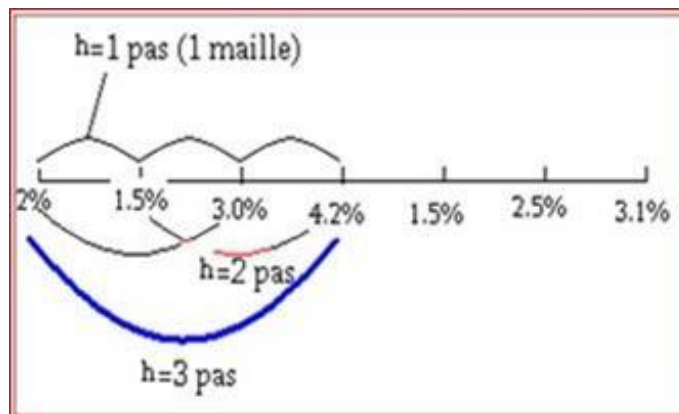


Figure 21: Schéma de calcul du variogramme expérimental

On peut aussi calculer le variogramme selon certaines directions spécifiques à l'aide d'une expression particulière du variogramme :

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

$N(h, \theta)$: est le nombre de paires de points séparés d'une distance h dans la direction θ . (Figure II.5.) :

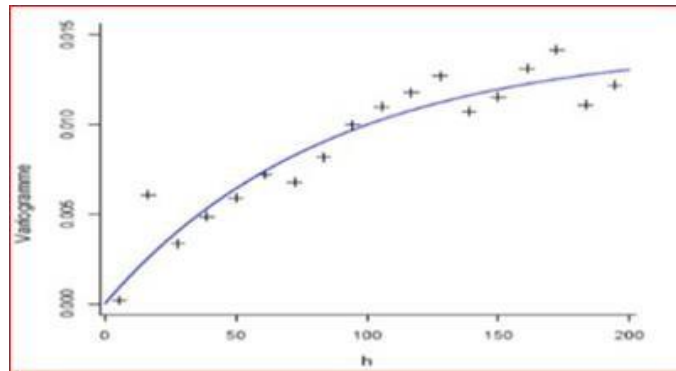


Figure 22: Ajustement d'un modèle théorique (courbe) à un modèle expérimental(croix)

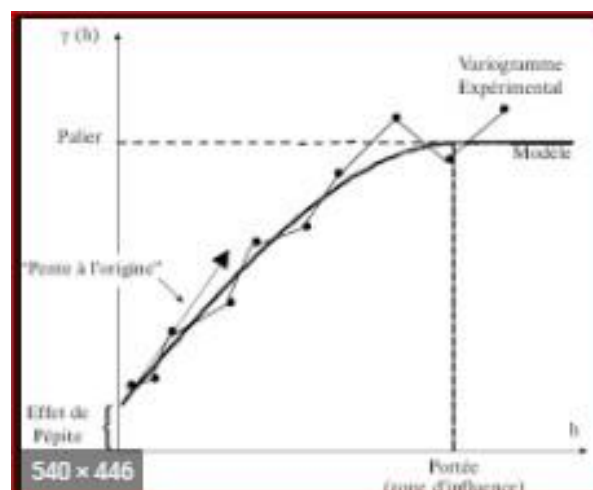


Figure 23 : Graphe d'un variogramme expérimental et son modèle d'ajustement

Il existe un nombre important de modèles de semivariogramme, nous mentionnons les plus importants aux modèles suivants :

IV.1.4.2.1 -Modèle exponentiel :

$$\gamma(h) = C \left[1 - \exp \left(-3 \frac{h}{a} \right) \right]$$

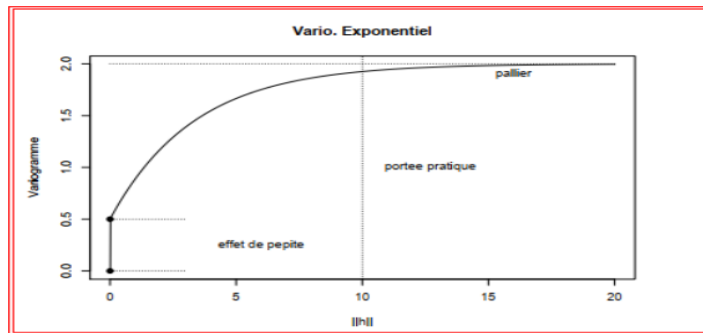


Figure 24: Modèle type de variogramme exponentiel

IV.1.4.2.2 B-Modèle gaussien :

$$\gamma(h) = C \left[1 - \exp \left(-3 \left(\frac{h}{a} \right)^2 \right) \right]$$

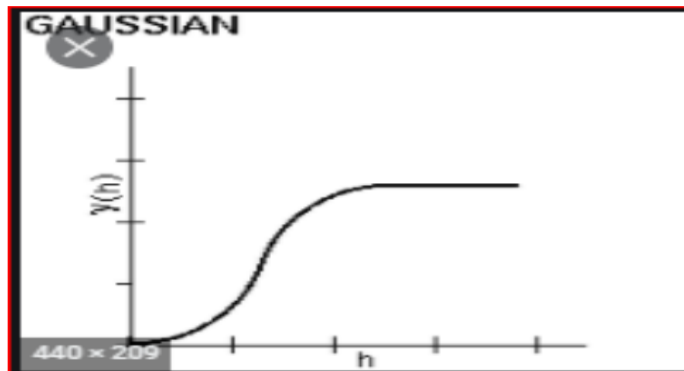


Figure 25: Modèle type de semivariogramme gaussien C-Modèle sphérique

$$\gamma(h) = \begin{cases} c \left[\frac{3h}{2a} - \frac{1}{2} \left(\frac{h}{a} \right)^3 \right] & \text{si } 0 < h < a \\ C & \text{si } h \geq a \end{cases}$$

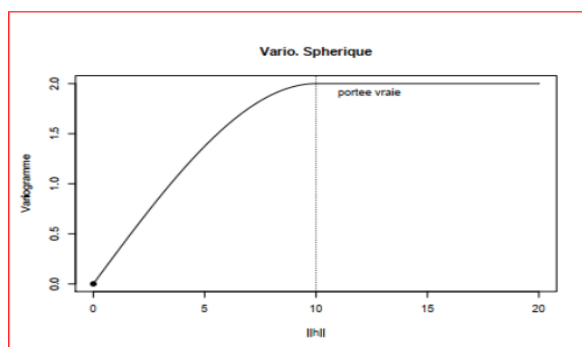


Figure 26: Modelé type de variogrammesphérique

Chapitre V
Outils numérique utilise logiciel surfer

V . Outils numérique utilise logiciel surfer :

Introduction :

Le logiciel Surfer 16, conçu par Golden Software, vous permet de réaliser des modèles numériques de terrain (MNT) issus des données que vous aurez récoltées sur le terrain via DGPS. Le principe de Surfer est le suivant : le logiciel vous permet de créer des grilles qui vont interpoler les données irrégulières de vos points x, y, z afin de les ordonner. C'est à partir de ces grilles qu'on pourra créer plusieurs types de cartes : base Map, contour Map, 3D surface, vector et bien d'autre.

Les possibilités d'utilisation sont nombreuses. Avant de commencer, sachez qu'il existe un tutoriel complet dans le logiciel dans lequel chaque manipulation possible est expliquée. Il existe également un lien vers le site officiel de Golden Software sur lequel vous trouverez quelques vidéos pédagogiques, des explications et des forums bien fournis.

Le but à travers ce tutoriel est de faire gagner du temps aux nouveaux stagiaires qui prennent le relai du réseau de surveillance de l'action 6 afin de leur éviter de longues recherches. Cependant, gardez à l'esprit que ces outils existent.

V.1 Présentation de l'interface du logiciel :

L'interface se présente comme souvent pour les logiciels de traitement de l'information géographique de la manière suivante.

Une barre des menus en haut (**Figure 27**).



Figure 27: Barre des menus

Nous utiliserons principalement les menus Grid et Map un cadre principal (plot) dans lequel s'affichera vos cartes au centre, et à gauche, le cadre objet manager

(Figure 28) dans lequel vous pourrez modifier la disposition de vos données, les afficher ou les supprimer, en modifier la symbologie, etc. Par analogie, cela ressemble aux calques d'adobe illustration ou plus encore aux couches des logiciels de SIG.

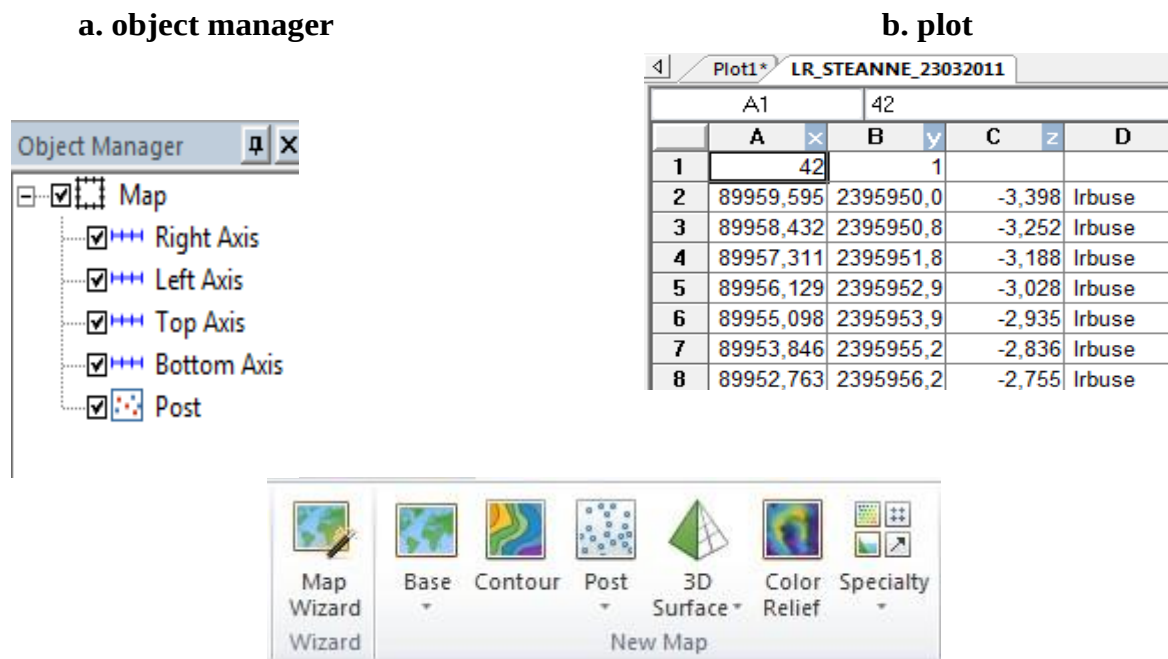
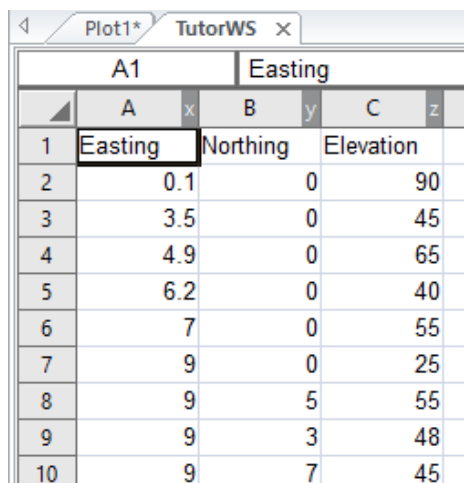


Figure 28: Différentes cartes possibles.

V.1.1 Mise en forme le fichier Excel :

Vos données de terrain une fois téléchargées sont affichées sous Excel (Figure 29). Comme pour Profiler, il faudra effectuer un premier traitement sur Excel qui ressemblera fort à celui de Profiler avec néanmoins quelques petites différences.

Supprimez les mêmes colonnes que pour profiler. Vous avez ici une colonne supplémentaire que vous devez garder : celle où vous avez indiqué sur le terrain le code du levé, à savoir du semis ou des lignes de ruptures.



	A	B	C
1	Easting	Northing	Elevation
2	0.1	0	90
3	3.5	0	45
4	4.9	0	65
5	6.2	0	40
6	7	0	55
7	9	0	25
8	9	5	55
9	9	3	48
10	9	7	45

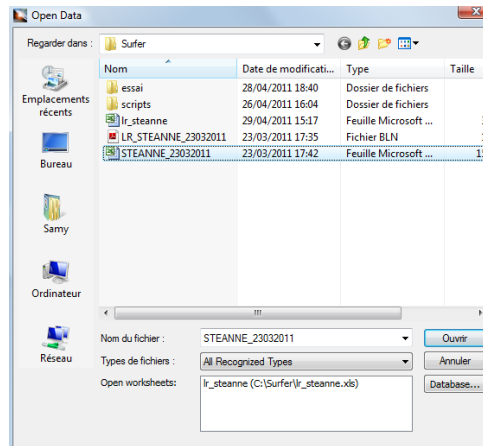
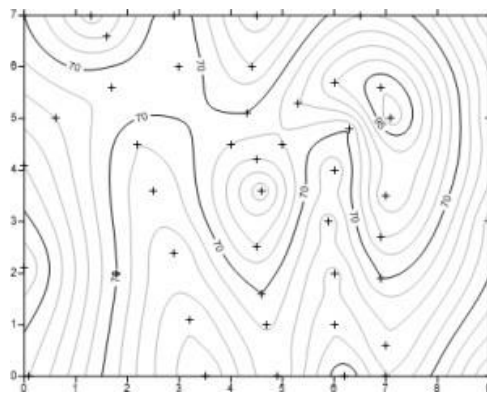
Figure 29: Worksheet Surfer

Pour séparer les lignes de ruptures, ouvrez un nouveau document Excel. Sélectionnez toutes vos lignes de rupture et copier/coller les dans la nouvelle feuille. Il est important de les conserver dans le premier fichier, ne les coupez pas.

Vos lignes de rupture ont sûrement des noms différents selon l'endroit où vous les avez relevées sur la plage. Pour une meilleure organisation des données et un affichage optimal sous surfer, il faut indiquer le nombre de lignes que vous avez pour chaque groupe de ligne de rupture.

V.1.2 Affichage des points :

A partir de votre simple fichier Excel (Figure 30), vous pouvez afficher vos points. Allez dans Map ; contour Map (Figure 31). Les points de votre plage s'affichent dans le plot. Dans Object manager s'affichent les composantes de votre Map (axes, titre, type d'affichage...).

**Figure 30:**Grille ouverte**Figure 31:** Carte de contour

V.1.3 Ouverture d'autres cartes :

A partir du menu Map (new), amusez- vous à expérimenter les contour Map, image Map, Shaded Relief Map, grid vector, 3D wireframe, 3D surface. Toutes ces cartes s'ouvrent à partir d'une grille. A vous de découvrir les spécificités de chacune. Pour plus de précisions sur la manière dont elles sont produites, je vous renvoie au tutoriel et au site internet (Figure III.8).

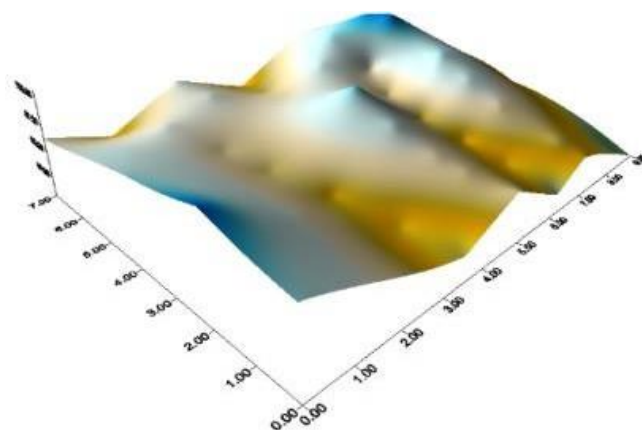


Figure 32: 3D Surface Map

V.1.4 Créer une grille x, y, z :

La Fenêtre (Figure 33) ci- dessous s'affiche. Les colonnes A, B, C représentent l'emplacement de vos coordonnées x, y, z. Cliquez sur view data pour vous assurer qu'elles correspondent bien. Si ce n'est pas le cas, vous pouvez les intervertir.

Le gridding Method correspond à la méthode d'interpolation utilisée. Par défaut, nous utilisons la méthode fiable en ce qui nous concerne, le Kriging.

Figure 33: Les options de quadrillage

V.1.5 Les Méthodes de quadrillage (Gridding Methods) :

Les paramètres de la méthode de grille contrôlent les procédures d'interpolation.

Lorsque vous créez un fichier de grille, vous pouvez généralement accepter la méthode de quadrillage par défaut et produire une carte acceptable. Chaque méthode aboutit à une représentation différente de vos données. Il est avantageux de tester chaque méthode avec un ensemble de données typique pour déterminer la méthode de quadrillage qui vous fournit l'interprétation la plus satisfaisante de vos données.

V.1.6 Les méthodes de quadrillage comprennent

- Distance inverse à une puissance
- Le krigeage
- Minimum Curvature
- Voisin naturel
- Voisin le plus proche
- Régression polynomiale
- Triangulation avec interpolation linéaire

V.1.6.1 Distance inverse à une puissance :

Avec la distance inverse à une puissance, les données sont pondérées pendant l'interpolation de telle sorte que l'influence d'un point par rapport à un autre diminue avec la distance du nœud de la grille. La pondération est attribuée aux données via l'utilisation d'une puissance de pondération qui contrôle la façon dont les facteurs de pondération diminuent à mesure que la distance par rapport à un nœud de grille augmente. Plus la puissance de pondération est élevée, moins il y a de points d'effet éloignés du nœud de grille lors de l'interpolation. À mesure que la puissance augmente, la valeur du nœud de grille se rapproche de la valeur du point le plus proche. Pour une

puissance plus petite, les poids sont répartis plus uniformément entre les points de données voisins (Figure 34).

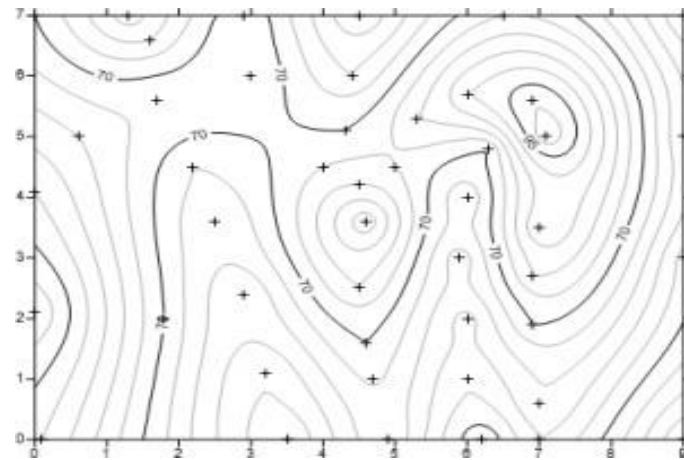


Figure 34: Distance inverse à une puissance grille

V.1.6.2 Méthode de Shepard modifiée :

Utilise une méthode des moindres carrés pondérés par la distance inverse. En tant que telle, Inverse Distance to a power modifiés est similaire à la distance inverse à un interpolateur de puissance, mais l'utilisation des moindres carrés locaux élimine ou réduit l'apparence « dans le mille » des contours générés. La méthode de Shepard modifiée peut-être soit un interpolateur exact, soit un interpolateur de lissage. Comme le montre dans la figure ci-dessous (Figure 35).

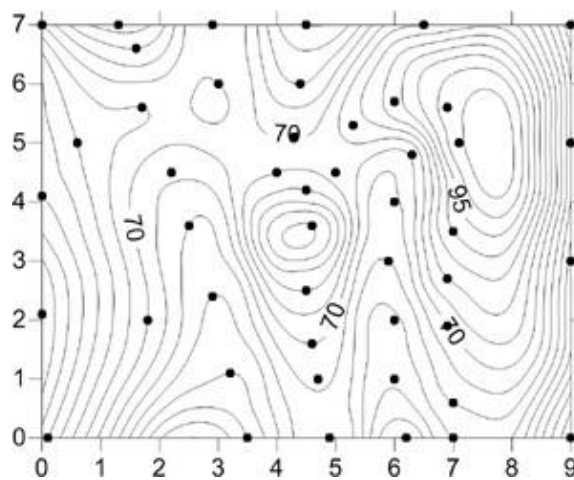


Figure 35: Modified Shepard's Method grille

V.1.6.3 Triangulation avec interpolation linéaire :

La méthode de triangulation avec interpolation linéaire de Surfer utilise la triangulation de Delaunay optimale. L'algorithme crée des triangles en dessinant des lignes entre les points de données. Les points d'origine sont connectés de telle manière qu'aucune arête de triangle ne soit coupée par d'autres triangles. Le résultat est un patchwork de faces triangulaires sur l'étendue de la grille (Figure 36). Cette méthode est un interpolateur exact.

La triangulation avec interpolation linéaire fonctionne mieux lorsque vos données sont uniformément réparties sur la zone de la grille. Les ensembles de données qui contiennent des zones clairsemées donnent des facettes triangulaires distinctes sur la carte.

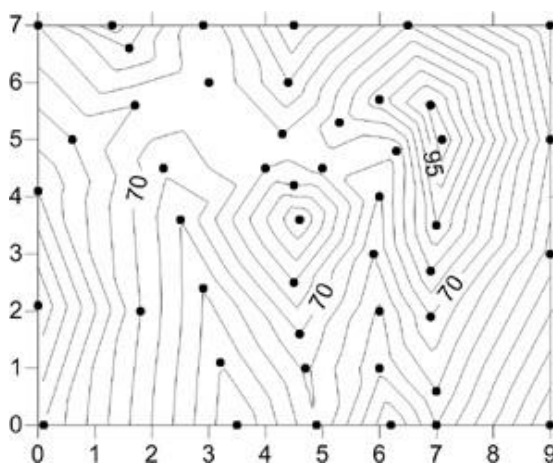


Figure 36: Triangulation with Linear Interpolation grille

V.1.6.4 Métriques de données :

La collecte de méthodes de quadrillage de métriques de données crée des grilles d'informations sur les données nœud par nœud. Les méthodes de quadrillage des métriques de données ne sont pas, en général, des interpolateurs moyens pondérés des valeurs Z. Par exemple, vous pouvez obtenir des informations telles que :

Le nombre de points de données utilisés pour interpoler chaque nœud de grille. Si le nombre de points de données utilisés est assez égal à chaque nœud de grille, alors la qualité de la grille à chaque nœud de grille peut être interprétée

L'écart type, la variance, le coefficient de variation et l'écart absolu médian des données à chaque nœud de la grille. Ce sont des mesures de la variabilité dans l'espace de la grille et sont des informations importantes pour l'analyse statistique

-La distance au point de données le plus proche. Par exemple, si les valeurs XY d'un ensemble de données sont des emplacements d'échantillonnage, utilisez la métrique de données Distance au plus proche pour déterminer les emplacements des nouveaux emplacements d'échantillonnage. Une carte de contour de la distance au point de données le plus proche, quantifie où une densité d'échantillonnage plus élevée peut-être souhaitée

Data Metrics grille dans la figure ci-dessous (Figure 37)

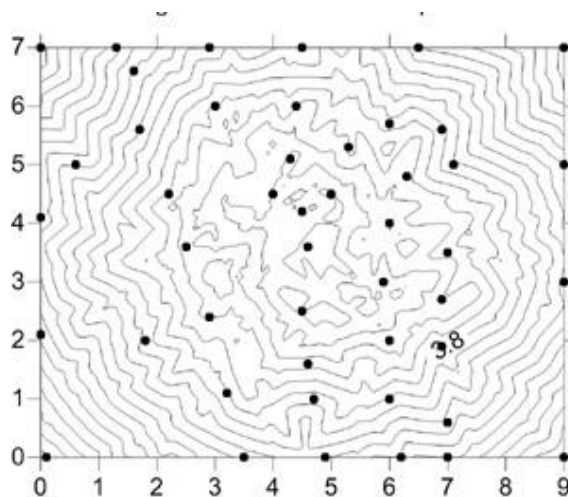


Figure 37:Métriques de données grille

V.1.6.5 Le krigeage :

Le krigeage est une méthode de quadrillage géostatistique qui s'est avérée utile et populaire dans de nombreux domaines. Cette méthode produit des cartes visuellement attrayantes à partir de données irrégulièrement espacées. Le krigeage tente d'exprimer les tendances suggérées dans vos données, de sorte que, par exemple, les points hauts puissent être connectés le long d'une crête plutôt qu'isolés par des contours de type bull's eye.

Le krigeage (Figure 38) est une méthode de quadrillage très flexible. Vous pouvez accepter les valeurs par défaut du krigeage pour produire une grille précise de

vos données, ou le krigeage peut être personnalisé sur un ensemble de données en spécifiant le modèle de variogramme approprié. Dans Surfer, le krigeage peut être un interpolateur exact ou un interpolateur de lissage en fonction des paramètres spécifiés par l'utilisateur. Il intègre l'anisotropie et les tendances sous-jacentes de manière efficace et naturelle.

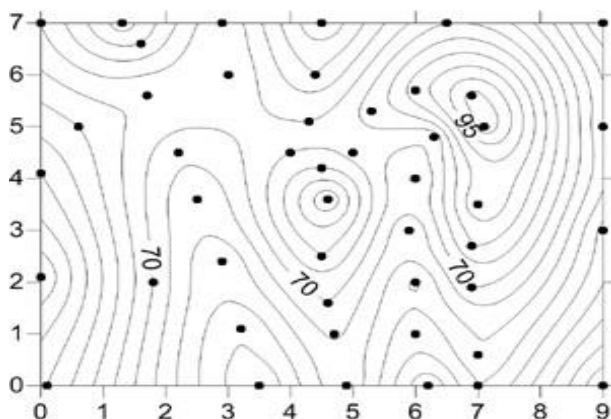


Figure 38: Grille de krigeage

Dans la boîte de dialogue (Figure 39) Données de grille, spécifiez Krigeage comme méthode de quadrillage et cliquez sur le bouton Options avancées pour ouvrir la boîte de dialogue Options avancées de données de grille.

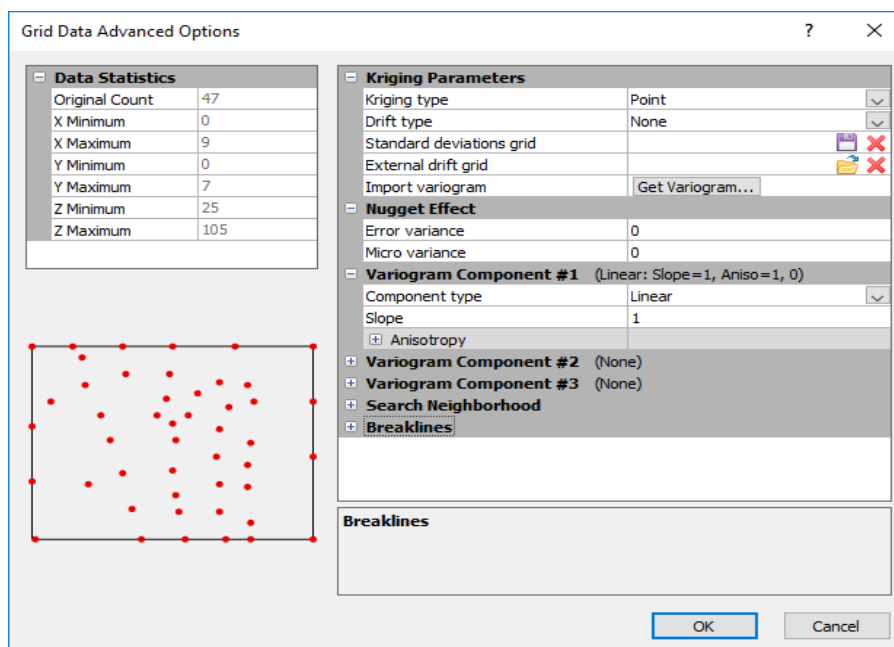


Figure 39: Boîte de dialogue Options avancées de krigeage

V.1.7 Composants du variogramme :

La figure 40 présente une fenêtre qui permet de choisir les propriétés du krigeage. Si vous n'avez pas modélisé le variogramme, laissez le variogramme réglé sur les valeurs par défaut d'origine (variogramme linéaire ; pente = 1, anisotropie = 1,0 ; pas d'effet de pépite).

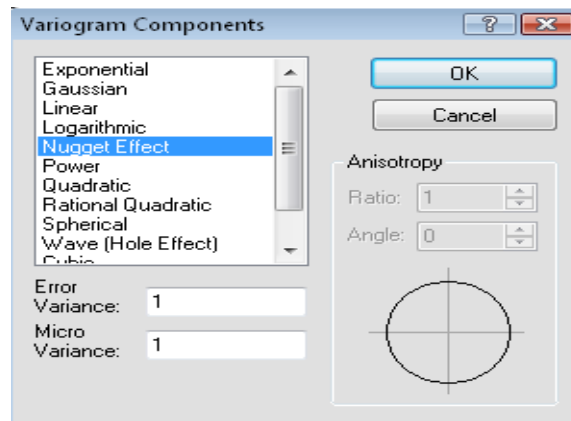


Figure 40: Composants du variogramme

V.1.7.1 Liste des modèles de variogramme :

Les principaux modèles implémentés dans le logiciel Surfer sont : Exponential, Gaussian, Linear, Logarithmic, Nugget Effect, Power, Quadratic, Rational Quadratic, Spherical, etc.

V.1.7.2 Fenêtre expérimentale de variogramme :

La Fenêtre Expérimental de la Fenêtre Propriétés (Figure 3.15.) contient des paramètres pour le variogramme expérimental tels que la direction du décalage, le type d'estimateur, la distance de décalage maximale, le nombre de décalages, la largeur du décalage et l'échelle verticale

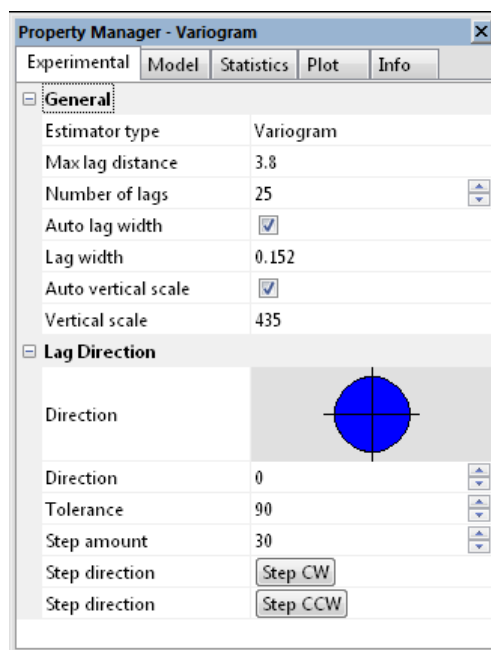


Figure 41: La Fenêtre des Propriétés du modèle expérimental

La Fenêtre Expérimental de la Fenêtre Propriétés (Figure 41) contient les paramètres du variogramme expérimental. Le diagramme de la section Direction du décalage montre la direction et la taille de la Fenêtre angulaire du variogramme actuel.

V.1.7.3 Fenêtre modèle :

La Fenêtre Modèle vous permet de définir un modèle de variogramme spécifique et ses paramètres tels que les composants du variogramme, la variance d'erreur, la micro variance, l'ajustement automatique du variogramme et l'anisotropie.

La Fenêtre Modèle de la boîte de dialogue Propriétés (Figure 42) du variogramme vous permet de définir un modèle de variogramme spécifique et ses paramètres. Calculer un variogramme expérimental à partir de vos données est le seul moyen sûr de déterminer quel modèle de variogramme vous devez utiliser. Il y a de longs chapitres dans de nombreux manuels de géostatistique traitant des outils et des techniques nécessaires pour générer un variogramme

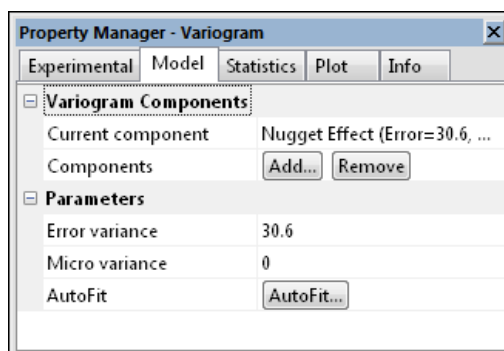


Figure 42: La boîte de dialogue Propriétés

V.1.7.4 Graphiques du modèle de variogramme :

En cas de doute, vous devez utiliser le modèle de variogramme linéaire avec les paramètres par défaut seuil (C) et portée (a). Dans les propriétés du variogramme de la Fenêtre Propriétés, cliquez sur l'onglet Modèle. Cliquez sur le bouton Ajouter pour ouvrir la boîte de dialogue Ajouter un composant. Sélectionnez l'un des composants du modèle de variogramme (Figure 43) et cliquez sur le bouton OK.

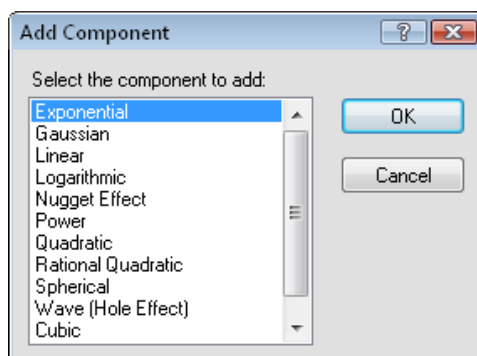


Figure 43: Les modèles de variogramme

V.1.7.5 Fenêtre Statistiques :

Cliquez sur le bouton Afficher les statistiques de la Fenêtre Statistiques de la Fenêtre Propriétés pour afficher les histogrammes et les nuages de points des données, ainsi que fournir des statistiques sur les données. Pour ouvrir la boîte de dialogue Statistiques, cliquez sur le variogramme existant. Dans la Fenêtre Propriétés, cliquez sur l'onglet Statistiques. Cliquez sur le bouton Afficher les statistiques et la boîte de dialogue Statistiques s'ouvre.

Dans la boîte de dialogue Statistiques, vous pouvez afficher un histogramme X, Y ou Z, afficher des statistiques ou générer un rapport de variogramme (Figure44).

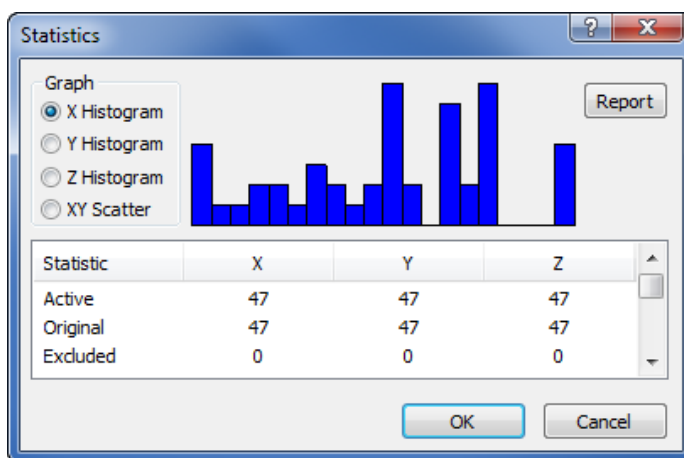


Figure 44:Statistiques

V.1.7.6 Éditeur de grille :

L'éditeur de grille vous permet également d'ouvrir un fichier image et de l'enregistrer en tant que fichier de grille (Figure 45).

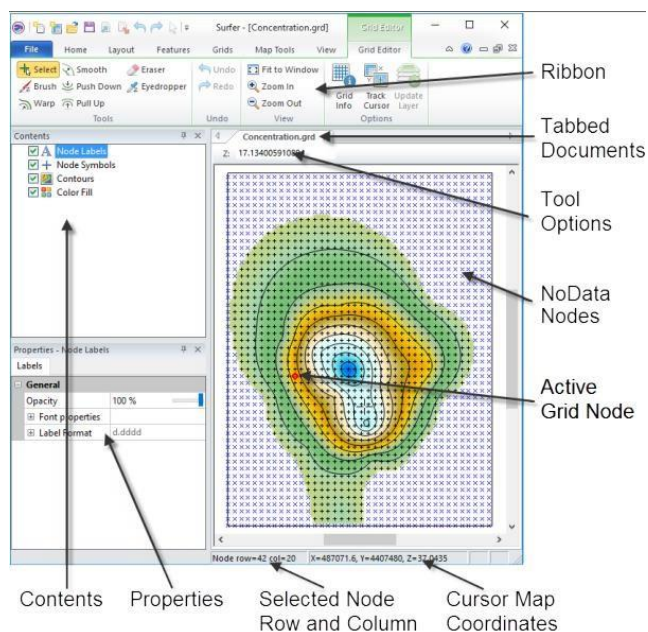


Figure 45:L'éditeur de grille

V.1.8 Montage du variogramme surfer :

V.1.8.1 Les paramètres du variogramme :

Le modèle de variogramme spécifie mathématiquement la variabilité spatiale de l'ensemble de données et du fichier de grille résultant. Les poids d'interpolation, qui sont appliqués aux points de données pendant les calculs des nœuds de grille, sont des fonctions directes du modèle de variogramme (Figure 46)

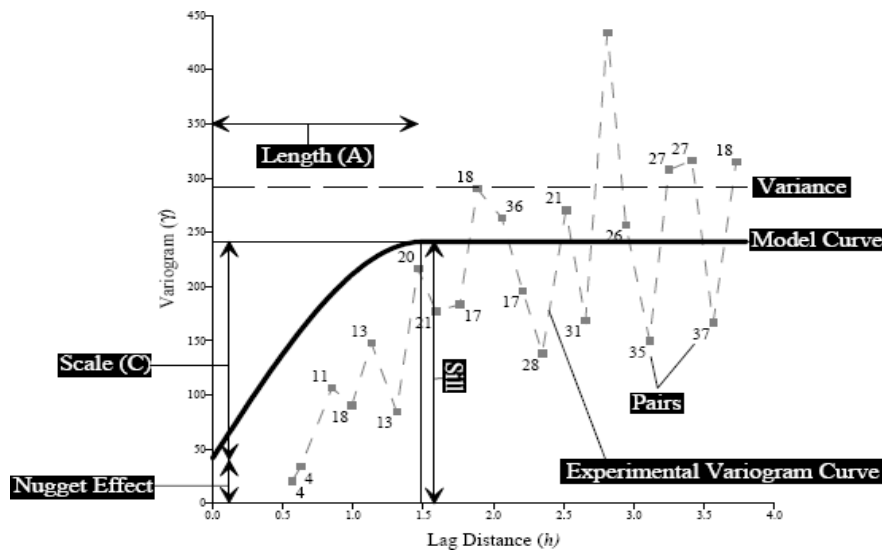


Figure 46: Les paramètres du variogramme

V.1.8.1.1 Effet de pépité :

L'effet pépité quantifie les erreurs d'échantillonnage et de dosage et la variabilité à courte échelle.

V.1.8.1.2 Le seuil partiel :

Le seuil partiel (c1) est de la composante verticale structurée du variogramme.

V.1.8.1.3 Le seuil :

Le seuil est l'échelle verticale totale du variogramme (effet pépité + somme de toutes les échelles des composants). Les modèles de variogramme linéaire, logarithmique et de puissance n'ont pas de seuil.

V.1.8.1.4 La portée :

La longueur est la plage horizontale du variogramme. (Certains modèles de variogramme n'ont pas de paramètre de longueur ; par exemple, le modèle linéaire a une pente à la place.)

V.1.8.1.5 La variance :

La variance est l'écart quadratique moyen de chaque valeur par rapport à la valeur moyenne. La variance est indiquée par la ligne horizontale en pointillés dans le diagramme ci-dessus.

Chapitre VI
Validation sur un cas réel

VI . Validation sur un cas réel

VI.1 La piézométrie de la zone d'étude :

Les cartes piézométriques, établies principalement avec des données sur les niveaux piézométriques, représentent à une date et à une période donnée la distribution spatiale des charges et des potentiels hydrauliques dans une nappe donnée. Elles représentent également les conditions aux limites hydrodynamiques. Il est évident que, le régime naturel des eaux souterraines peut être perturbé par la surexploitation des ouvrages de captages (forages et puits) qui constituent une source d'épuisement et de diminution. C'est ce que nous allons confirmer par l'étude hydrogéologique de la nappe de la commune d'Eloued. La région d'étude englobe 17 points d'eau, la moitié de ces points d'eau répartis dans la zone d'étude.

VI.1.1 Inventaire des points d'eau :

Dans la présente étude, 17 points d'eau en Complexe Terminale ont été recensés ont presque même profondeur sont destinées à l'exploitation pour l'alimentation en eau potable.

Un réseau de points d'inventaire représentatif de toute la nappe a été utilisé pour l'établissement des cartes piézométrique (Figure 47).

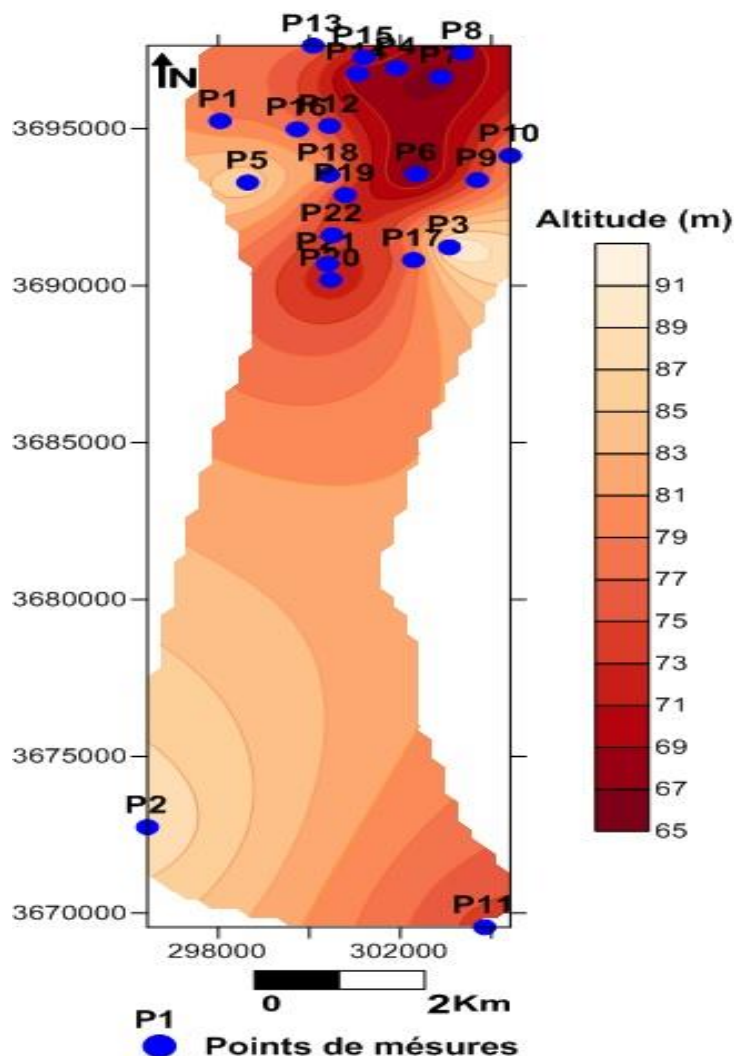


Figure 47: Carte de répartition des points de mesures de la région d'étude

VI.1.2 Evolution de la piézométrie :

L'établissement d'une carte piézométrique est une étape très importante, C'est une figure schématique de la distribution spatiale, elle représente la morphologie de la surface piézométrique des nappes à une période déterminée. L'analyse des cartes piézométriques permet de définir l'écoulement souterrain et de localiser les zones d'alimentation si a eu lieu et de sorties des eaux de la nappe aquifère des CT et de déterminer le gradient hydraulique qui est un paramètre important dans l'estimation des apports latéraux.

L'établissement la carte piézométrique pour l'année 2023, s'est réalisée par interpolation, en utilisant le logiciel de Surfer 19. L'observation de la morphologie de la carte piézométrique de l'année 2023 permet de constater que l'écoulement souterrain se fait, en général, de Sud-Ouest vers Nord-Est (Figure 48). L'étude hydrodynamique

et les cartes piézométriques nous a permis de constater que le sens d'écoulement des eaux souterraines est orienté suivant une direction générale Sud -Nord dans tous les aquifères de la région d'étude. On observe les directions dans le CT sont : SN, EO. Ceci est confirmé par les cartes piézométriques des aquifères CT.

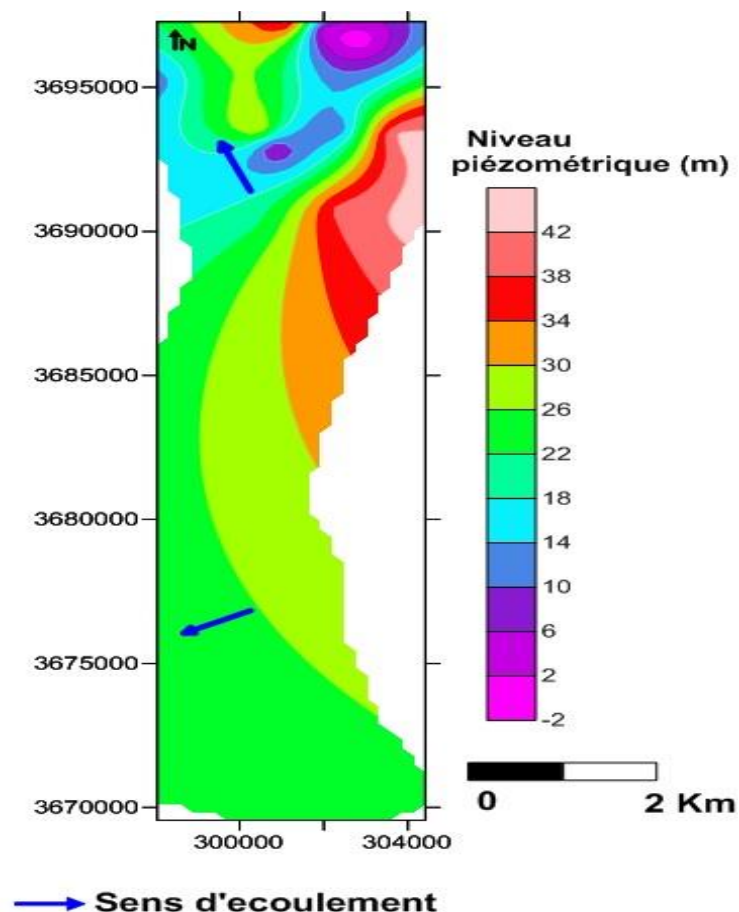


Figure 48: Carte piézométrique de la nappe de complexe terminale des communes de la région d'étude pour l'année 2023

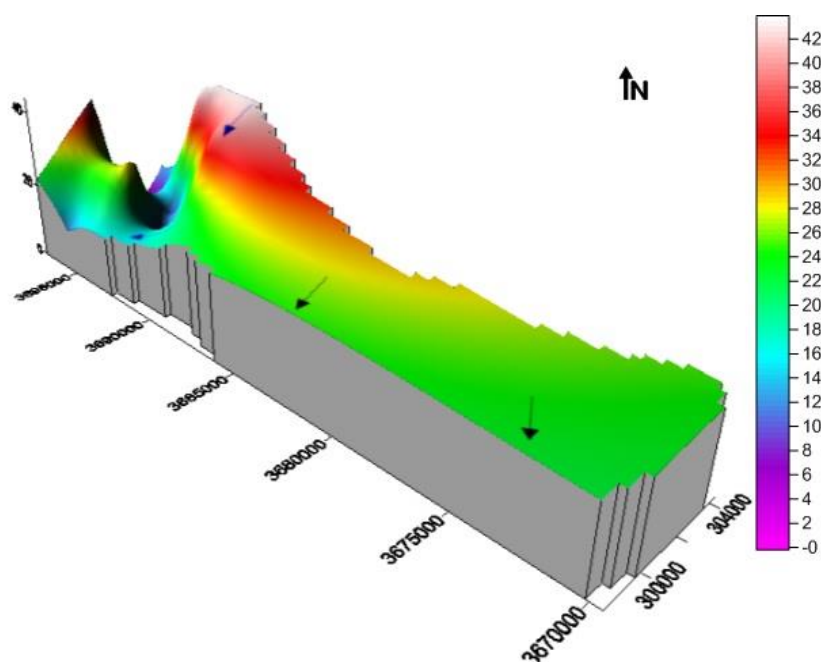


Figure 49: Bloc diagramme 3D représentant le niveau piézométrique, données de 2023.

Aussi dans la figure N°3, nous remarquerons une élévation à l'extrémité NE (une ligne de crête) d'où se fait le partage des eaux vers l'Ouest et le Sud. La direction Est-Sud coïncide avec l'orientation des principales structures de l'aquifère du site d'étude. Pour réaliser le variogramme nous prendrons en compte cette orientation (45°).

VI.2 Estimation le niveau piézométrique de la commune d'Eloued :

VI.2.1 Données et méthodes de traitement:

Pour déterminer le niveau piézométrique spatial de de la région d'étude, on a utilisé les données du niveau statique issues des points d'eaux et les données géographiques spatiales qui déterminent le relief environnant chacune de ces points ; et on utilise les méthodes de krigeage par point et le krigeage universel.

Les techniques d'interpolation spatiale peuvent être séparées en deux principales catégories : les approches déterministes et géostatistiques. Pour faire simple, les méthodes déterministes n'essayent pas de capturer la structure spatiale des données. Elles utilisent seulement des équations mathématiques prédéfinies pour prédire des valeurs à des positions où aucun échantillon n'est disponible (en pondérant les valeurs attributaires des échantillons dont la position dans la parcelle est connue). Au contraire, les méthodes géostatistiques cherchent à ajuster un modèle spatial aux données. Cela

permet de générer une valeur prédite à des positions non échantillonnées dans la parcelle (comme les méthodes déterministes) et de fournir aux utilisateurs une estimation de la précision de cette prédiction. Les approches géostatistiques regroupent le krigeage et ses dérivés. Toutes les méthodes d'interpolation sont basées sur le fait que les données spatiales sont auto-corrélées. Tout est relié à tout le reste, mais les choses proches partagent plus de caractéristiques que des choses distantes. Les méthodes d'interpolation peuvent être utilisées pour prédire des valeurs à des positions spécifiques dans l'espace ou peuvent être utilisées sur une grille d'interpolation sur l'ensemble de la parcelle considérée. Cette grille est composée de pixels régulièrement espacés dont la taille peut dépendre de la précision recherchée dans la carte interpolée ou bien de la structure spatiale du jeu de données.

Deux méthodes d'interpolation spatiale sont comparées dans l'étude afin d'évaluer la ou les plus performantes d'entre elles pour la production d'une carte piézométrique. Les techniques évaluées sont exposées ici brièvement. Dans le cadre de notre travail on utilise les deux types de krigeage pour estimer le niveau piézométrique de l'aquifère de la zone d'étude.

Le krigeage est une méthode locale stochastique (ou géostatistique) développée par Matheron (1963, 1970). Il s'agit d'un interpolateur exact qui tient compte de la taille du champ à estimer et de la position des points entre eux (c'est-à-dire l'interdépendance des variables), et prend en considération la continuité spatiale de la zone étudiée. C'est une méthode d'estimation linéaire minimisant la variance d'estimation telle que calculée à l'aide du variogramme. Il existe généralement deux types de krigeage: universel et ordinaire.

VI.2.1.1 Krigeage ordinaire:

Cette méthode est peut-être l'approche de krigeage la plus largement reportée. Contrairement au krigeage simple, cette technique considère que la tendance est constante mais seulement au niveau d'un voisinage local (Fig. 50). Cette hypothèse est intéressante parce qu'elle assure de prendre en compte les variations locales au sein d'une parcelle. Le krigeage ordinaire (par point ou par block) peut être exprimé

de la façon suivante :

$$Z(s)=m(s)+e(s) \quad Z(s)=m(s)+e(s) ;$$

Ici, la tendance dépend de la position spatiale des observations ($m(s)$). Cette tendance constante est considérée inconnue et doit être déterminée à partir du voisinage de données correspondant.

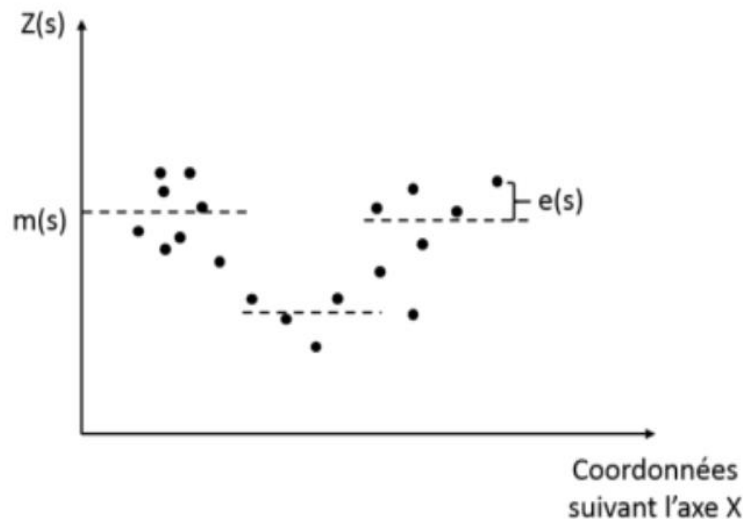


Figure 50: Krigeage ordinaire et tendance et résidus correspondants

VI.2.1.2 Krigeage universel ou à tendance externe :

Le krigeage par régression a plusieurs noms : le krigeage universel ou le krigeage avec une tendance externe. Cette méthode est similaire au krigeage ordinaire dans le sens où la tendance n'est pas constante sur la totalité de la parcelle mais dépend de la position des observations dans l'espace. Néanmoins, ici, la tendance est modélisée par une fonction plus complexe, elle n'est pas simplement considérée constante au sein d'un voisinage local (Fig. 51). L'objectif est le même que précédemment : enlever la tendance des données pour que les résidus auto-corrélés puissent être étudiés. A la fin de l'interpolation, la tendance est rajoutée aux résidus interpolés.

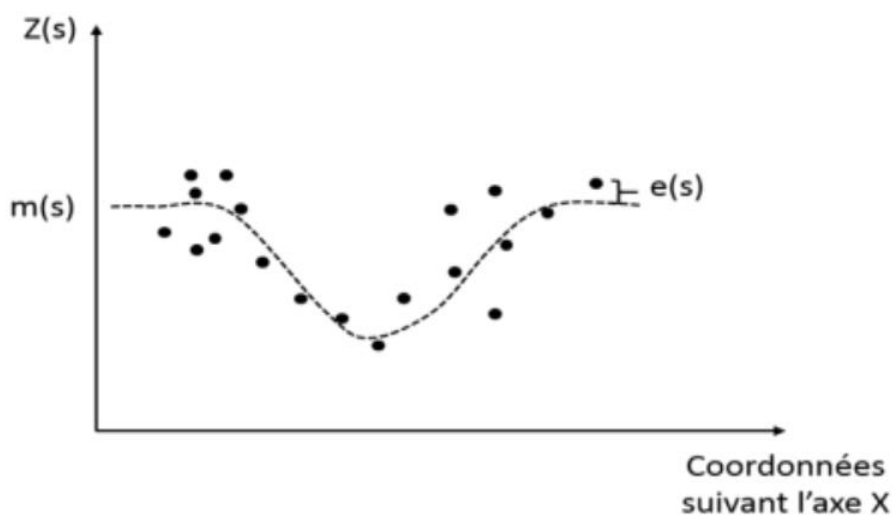


Figure 51: Krigeage par régression et tendance et résidus correspondants

Dans l'étude comparative deux méthodes de krigeage ordinaire par point le krigeage universel sera testées et évaluées.

VI.2.2 Résultats et discussions:

Nous illustrons dans ce chapitre, une carte mesurée qui est la carte représentative des données piézométriques prises sur le terrain, et des cartes de valeurs estimées qui sont représentatives des valeurs calculées par interpolation à partir des données de terrain, obtenues après modélisation des variogramme, selon la méthode de deux type krigeage. Les traitements statistiques permettent de décrire la distribution des données et caractériser statistiquement la variable étudiée (loi de distribution et moyenne) et leur dispersion (coefficient de variation, variance). Les paramètres statistiques obtenus sont résumés dans le **tableau 12**.

Tableau 12: Etude statistique des valeurs mesurées en 2023

Données	Valeurs
Nombre de points de mesures	1 7
Etendue	42m
Minimum	-1m
1 ^{er} quartile	10m
Médiane (2 ^{ème} quartile)	26m
Moyenne	23m
3 ^{ème} quartile	31m
Maximum	43m
Ecart type	14,14m
Variance	200,14m ²

Coefficient de variation	0,8%
Coefficient d'asymétrie	-0,25
Coefficient d'aplatissement	1,58

Pour 17 points de mesures, nous avons une étendue de 42m, c'est-à-dire une valeur minimale de -1m et une valeur maximale de 43m. Nous avons une différence entre la médiane (valeur centrée) (26m) et la moyenne (23m). L'analyse des niveaux piézométriques montre qu'il y a une forte variabilité avec un coefficient de variation de 0,8%, il traduit une dispersion relative donc la piézométrie est plus ou plus hétérogène dans la zone d'étude, alors que l'écart type une dispersion absolue de 14,14m. Nos données présentent une asymétrie négative de -0,25 plus marqué vers les faibles valeurs, ainsi qu'une valeur d'aplatissement égale à 1.58 indiquant également une asymétrie dans la distribution des données.

La figure N°4 est un histogramme représentatif de la distribution de fréquences par intervalle de classes des données du niveau piézométrique mesurées en 2023. L'effectif n'est pas régulier, on remarquera, un nombre élevé de puits ayant un niveau piézométrique de 28m ,32m et 40m.

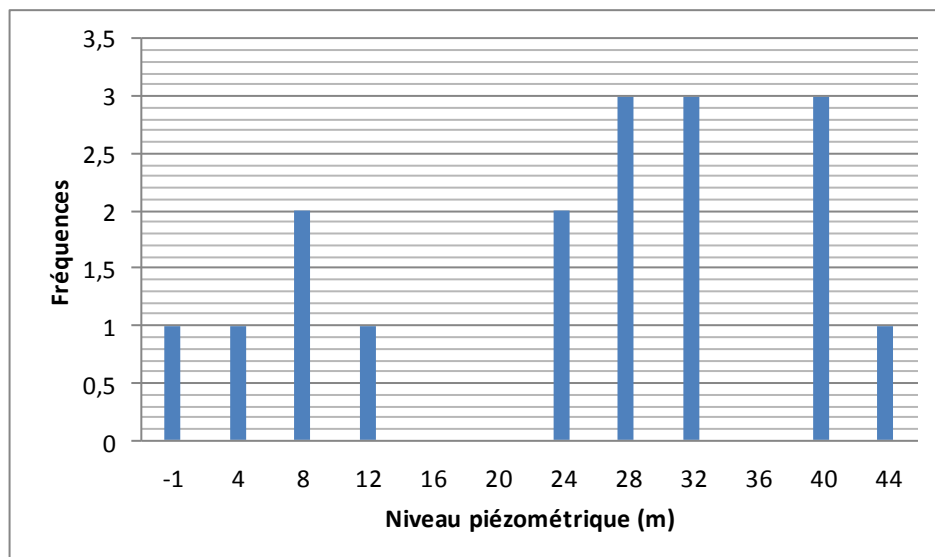


Figure 52: Histogramme des fréquences des données piézométriques

Sur la figure suivante (fig 53), nous avons classé les valeurs des niveaux piézométrique par quartile cela même énoncé dans le tableau 12. Même si la répartition des points est dense, elle reste irrégulière de par la divergence des valeurs piézométriques. Au Nord, nous remarquons que les quatre types de valeurs sont un peu divergents.

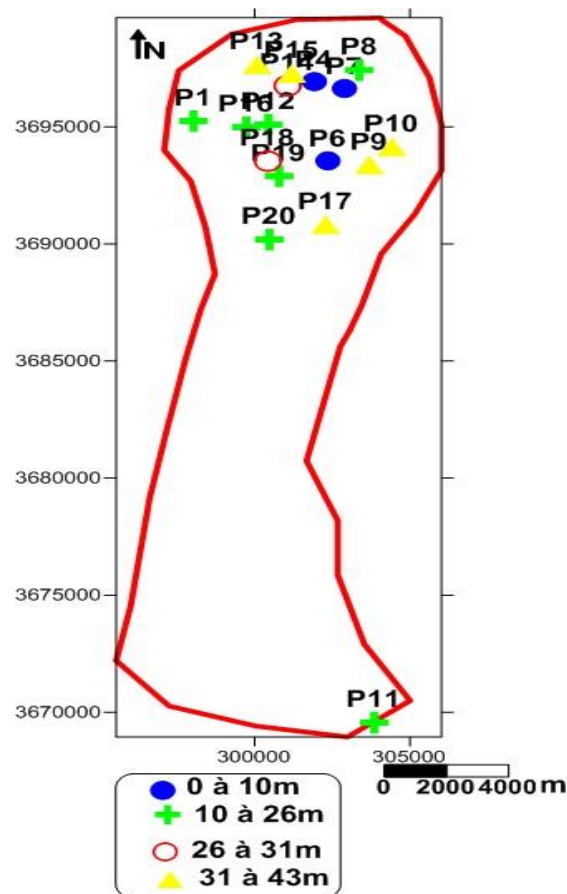


Figure 53: Carte des données en quartiles (2023)

Le variogramme peut être interprété en terme de continuité ou de corrélation spatiale si on l'inverse graphiquement pour obtenir une fonction décroissante : plus la distance entre deux mesures est importante moins les mesures sont corrélées. Le variogramme est la clé de voute de l'analyse spatiale par Krigeage, il permet de détecter les points d'anomalie par leur position par rapport aux autres. Les points isolés sont à supprimer pour avoir une bonne corrélation spatiale. Une fois que le variogramme expérimental établi, il faut lui caler un modèle qui lui convient le mieux, il n'est pas toujours facile de trouver le modèle théorique qui lui correspond. En hydrogéologie, l'anisotropie est reconnue puisque les fluctuations de la charge hydraulique ne se font pas dans le même sens et ceci dans toutes les directions (à cause de la nature des terrains que l'eau traverse, la structure, l'effet de pompage, etc.). La figure 6 confirme cette vérité de par l'allure différente de chacune des courbes pour les quatre directions (0° , 45° , 90°). Ces courbes ne présentent pas d'effet de pépité et elles se démarquent les unes des autres.

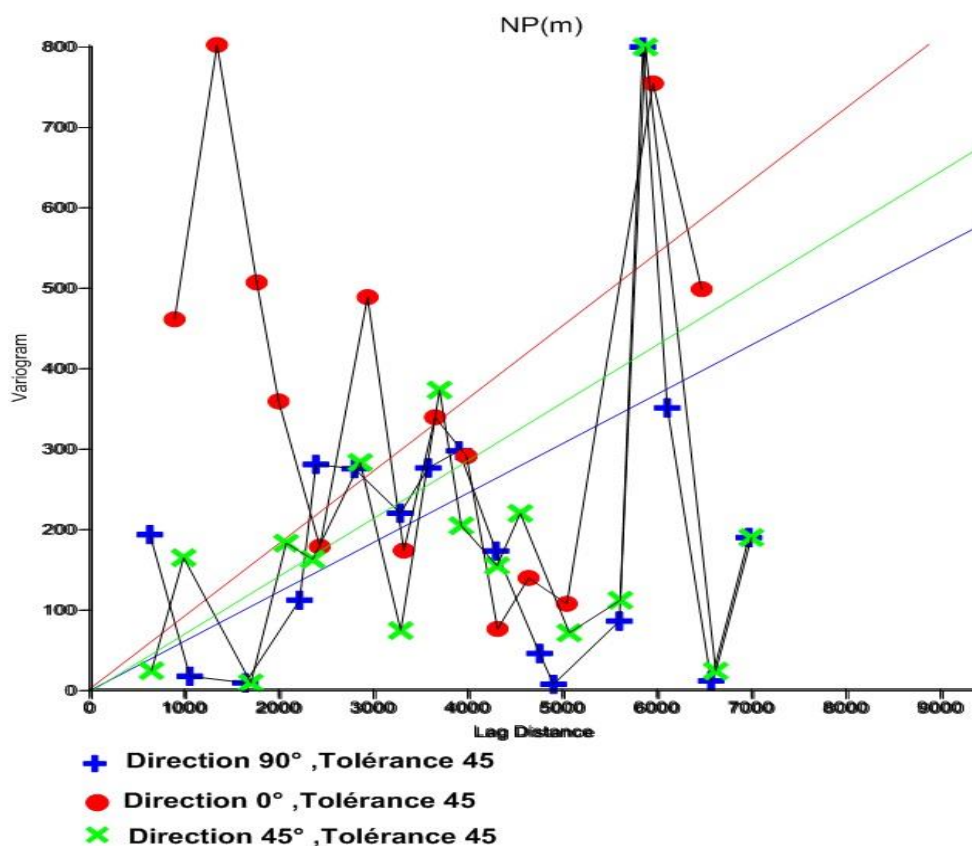


Figure 54: Variogramme de niveau piézométrique mesuré (2023), démontrant l'anisotropie.

Les **figures 55 et 56** présentent les variogramme expérimentaux et le modèle de variogramme ajusté aux données.

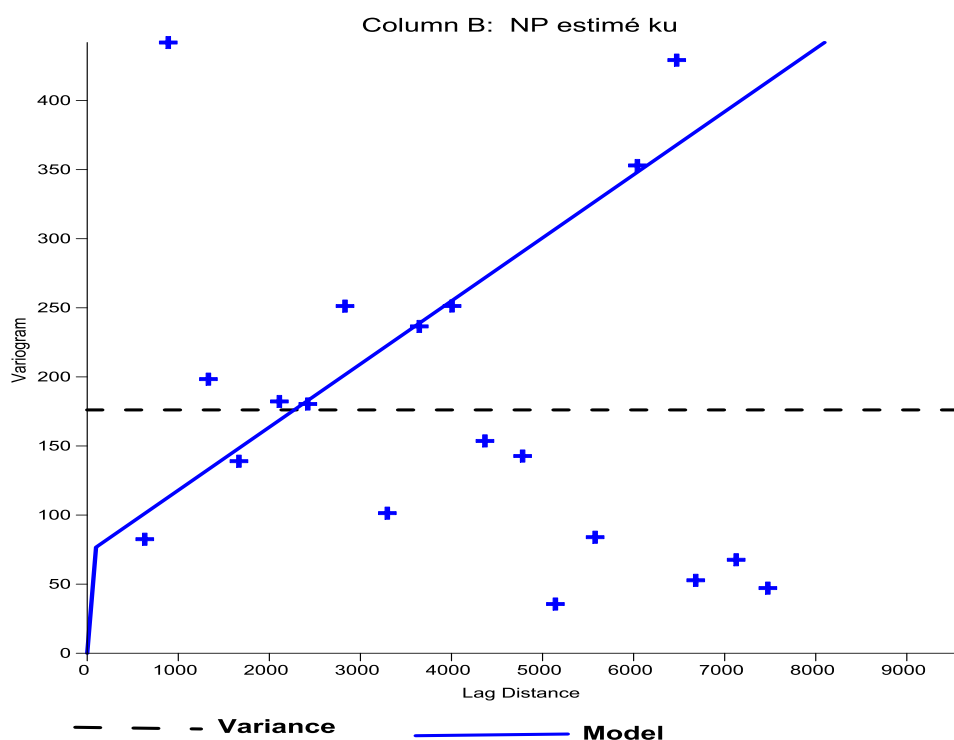


Figure 55: Les variogramme expérimentaux et les modèles de variogramme ajustés aux données résultants du Krigeage universel pour les niveaux piézométriques de la zone d'étude.

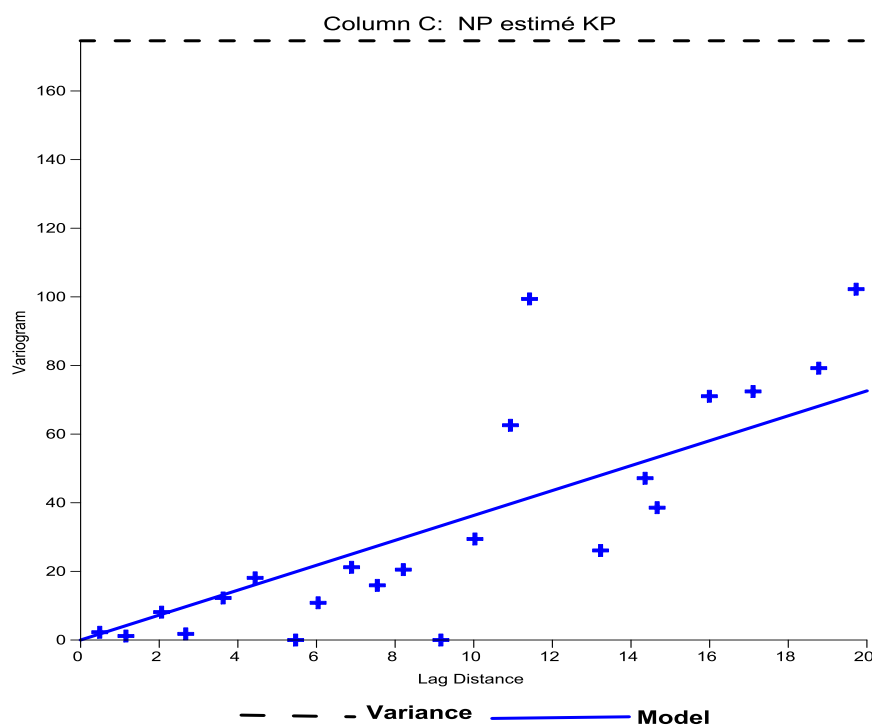


Figure 56: Les variogramme expérimentaux et les modèles de variogramme ajustés aux données résultants du Krigeage par point pour les niveaux piézométriques de la zone d'étude.

Les valeurs des variogramme des deux méthodes de krigeage sont présentées dans le tableau ci- dessous.

Tableau 13:Caractéristiques de variogramme expérimentaux pour les deux méthodes de krigeage

Type de Krigeage	Portée (m)	Palier	Effet de pépite	Nombre de classes	Angle de direction	Type de variogramme
Krigeage universel	1000	185,71	0	12	38°	Combinaison entre les variogramme linear, gaussien et Sphérique
Krigeage par point	2000	222,81	0	12	40°	Linear

Les niveaux piézométriques sont non corrélés au-delà de la distance où le modèle de variogramme se stabilise autour d'une portée, 2000 m pour le cas du krigeage ordinaire et 1000m pour le krigeage universel. Nous remarquons, qu'il n'y a pas un effet de pépite pour les deux techniques du krigeage, il indique que le variogramme tend vers 0 pour des petites distances.

Nous constatons sur le tableau 2 que l'ajustement géostatistique est moyennement similaire entre la méthode ordinaire et celle universelle. Le variogramme peut être interprété en terme de continuité ou de corrélation spatiale si

on l'inverse graphiquement pour obtenir une fonction décroissante : plus la distance entre deux mesures est importante moins les mesures sont corrélées.

VI.2.2.1 Carte interpolée par krigeage :

Le cadre probabiliste de la géostatistique permet de quantifier l'incertitude associée à la valeur interpolée à l'aide de la moyenne des erreurs d'estimation et l'écart type des erreurs d'estimation. En principe l'estimation est d'autant meilleure que la moyenne des erreurs d'estimation et des erreurs réduites (standardisées) est plus proche de 0, ce critère traduit la bonne précision de l'estimateur, et la variance des erreurs standardisées est plus proche de 1, ce critère indique que l'écart-type de krigeage reflète correctement la précision de l'estimation (Wilfried, 2006).

La figure 9 présentés ci-dessous illustre les cartes estimées par les deux méthodes géostatistiques, krigeage universel et krigeage par point.

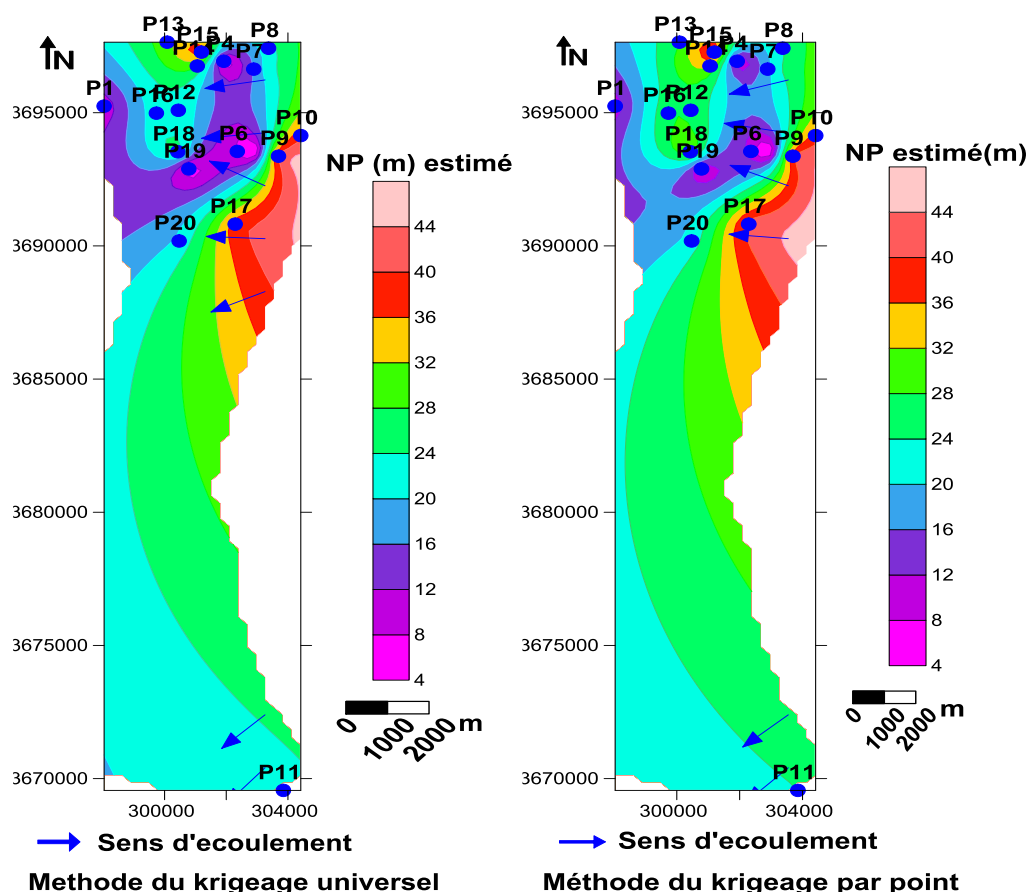


Figure 57: Les cartes piézométriques produites selon les différentes méthodes d'interpolation spatiale retenue (2023) de la zone d'étude

En comparant les tracés des isopièzes obtenus par les quatre méthodes (fig. 9) la constatation qui s'impose est que l'allure générale des courbes ne varie qu'assez peu d'une méthode à l'autre. L'observation de la morphologie des cartes piézométriques estimées des hautes eaux (2023) permet de constater que l'écoulement souterrain se fait, en général, de l'Est vers l'Ouest (Fig.9). Au l'extrémité Sud-ouest de la région d'étude et aux bordures, les courbes hydro-iso-hypses sont espacées par contre au nord de la région d'étude les courbes hydro-iso-hypses sont moyennement serrées.

VI.2.2.2 Comparaison des différentes méthodes d'estimation :

VI.2.2.2.1 A l'aide des moyens statistiques :

Pour choisir la méthode qui fournit les meilleurs résultats (c'est à dire une carte piézométrique représentative à partir de dix-sept mesures) on compare les résultats de validation croisée illustrées sur la figure 10.

La méthode de la validation croisée ou "cross validation" est un ensemble des paramètres statistiques permettant d'évaluer l'erreur d'estimation pour chaque méthode d'interpolation testée et cela pour la totalité des données des grilles générés (Tableau 3).

Le calcul de l'erreur quadratique moyenne (RMSE) et l'erreur moyenne relative (MRE) ont été fait. Il s'agit de l'indicateur le plus souvent utilisé pour évaluer le réalisme et l'exactitude des méthodes d'interpolation (Weng, 2002). RMSE, en raison de la mise au carré et de la racine, élimine les effets des surestimations et sous-estimations des niveaux piézométriques et permet de connaître l'erreur réelle provenant des méthodes d'interpolation. Elles se calculent ainsi:

$$RMSE = \sqrt{1/N \sum_{i=1}^n (Z(xi) - P(xi))^2} \dots\dots\dots (2) ;$$

$$MRE = 1/N \sum_{i=1}^n |(Z(xi)-P(xi))/Z(xi)| \dots\dots\dots (3) ;$$

Ainsi, pour chaque point de mesure à l'étude, les deux méthodes d'interpolation ont été comparées à l'aide de RMSE et MRE provenant de la différence d'erreur entre

les points mesurés et les niveaux piézométriques interpolées. En principe, la valeur la plus faible obtenue avec le calcul de RMSE et MRE indique quelle méthode d'interpolation est la plus fiable, c'est-à-dire celle qui fournit les niveaux piézométriques la plus représentative de la piézométrie de la zone d'étude.

Avec N est le nombre des données interpolées, $Z(x_i)$ et $P(x_i)$ sont respectivement les valeurs observées et interpolées dans un emplacement i de coordonnées (x, y) dans l'espace géographique bidimensionnel. Plus la valeur du RMSE est faible plus l'estimation de l'interpolateur est bonne.

Tableau 14 : Résultat de l'analyse par "Cross Validation

Méthode d'interpolation	Erreur standard (ES)	Erreur moyenne (MRE)	RMSE	R	SK	CV
Krigeage universel	0,78	0,010	0,38	0,99	0,96	0,14
Krigeage par point	0,24	0,012	0,44	0,96	0,57	0,34

Le tableau 3 montre que l'erreur standard (Es) présente des valeurs faibles pour les deux méthodes de krigeage. Ce qui est confirmé par les valeurs de l'erreur moyenne relative (MRE) et l'erreur moyenne quadratique (RMSE).

Le coefficient d'obliquité (Sk) indique que les deux méthodes utilisées permettent d'avoir une moyenne distribution légèrement symétrique des valeurs interpolées, ce qui confirme aussi par le coefficient de variation (CV) avec des valeurs faibles inférieur à 0,5. Pour le coefficient de régression (R) plus la valeur tend vers 1 plus l'interpolation est exacte. Or, pour l'ensemble des techniques testées R est proche de 1 et avec un avantage du krigeage universel (0.99), ce qui traduit une relation linéaire entre les valeurs observées, c'est-à-dire non interpolées, et les valeurs prédites. Cela montre que cette méthode fonctionne correctement lors de l'interpolation des données piézométriques et ne génèrent pas de très grandes erreurs. Ces deux dernières méthodes s'adaptent bien aux données piézométriques testées.

Le résiduel est la différence entre la valeur observée ($Z(x_i)$) et la valeur interpolée ou prédite ($P(x_i)$) dans un emplacement, ce qui correspond à l'erreur de l'interpolation. Ainsi, l'étude comparative du résiduel de l'ensemble des techniques d'interpolation spatiale testées permet d'avoir d'importantes informations sur chaque

méthode et d'évaluer plus précisément la marge d'erreur qu'elle produite lors de l'interpolation. Pour le calcul du résiduel il a été tenu compte de la différence entre les valeurs des niveaux piézométriques de la nappe de la base de données initiales, produite à partir des données des niveaux statiques des points d'eaux de l'aquifère de la zone d'étude et les données topographiques de la région d'étude avant l'interpolation, et celles d'une base de données extraites de la grille interpolée aux mêmes emplacements. Cette opération est effectuée pour chaque méthode d'interpolation (tableau 15).

Tableau 15: Analyse statistique des résiduels de chaque méthode d'interpolation

Méthodes d'interpolation	Min (m)	Max(m)	SK	Standard déviation (SD)	coefficient de Kurtosis (K)	Erreur standard(ES)
Krigeage universel	-3,06	4,26	0,13	1,91	2,74	0,39
Krigeage par point	-4,43	1,79	0,06	1,78	1,77	0,51

Le tableau 4 indique que la distribution de l'erreur est presque symétrique pour le krigeage universel puisqu'elle présente les valeurs les plus proche de trois ($K=2,74$) du coefficient de Kurtosis (K). Le coefficient de Kurtosis est calculé comme suit (équation 4).

$$K = \frac{1}{N \cdot SD} \sum_{i=1}^n (Z(xi) - Zm(xi))^4 - 3 \dots \dots \dots (4)$$

Ce qui veut dire que cette méthode tend à homogénéiser l'erreur au niveau de la grille produite par interpolation. Le récapitulatif des statistiques de l'erreur standard (Es) montre que le krigeage universel est plus précis et moins biaisé car la moyenne des erreurs est plus proche de zéro, ainsi que la différence entre le maximum et le minimum du résiduel induit de valeur faible.

VI.2.2.2.2 A l'aide les cartes de l'erreur:

Les paramètres statistiques (RMSE et MRE) n'est pas suffisante pour quantifier l'incertitude des piézométries puisqu'elle ne permet pas d'évaluer la distribution spatiale de l'erreur (Weng, 2002). La réalisation de cartes de l'erreur est donc

nécessaire afin d'identifier les erreurs les plus élevées. Afin de comparer la localisation des erreurs en fonction des différentes méthodes d'interpolation testées, une carte de l'erreur a été réalisée pour les points de mesures.

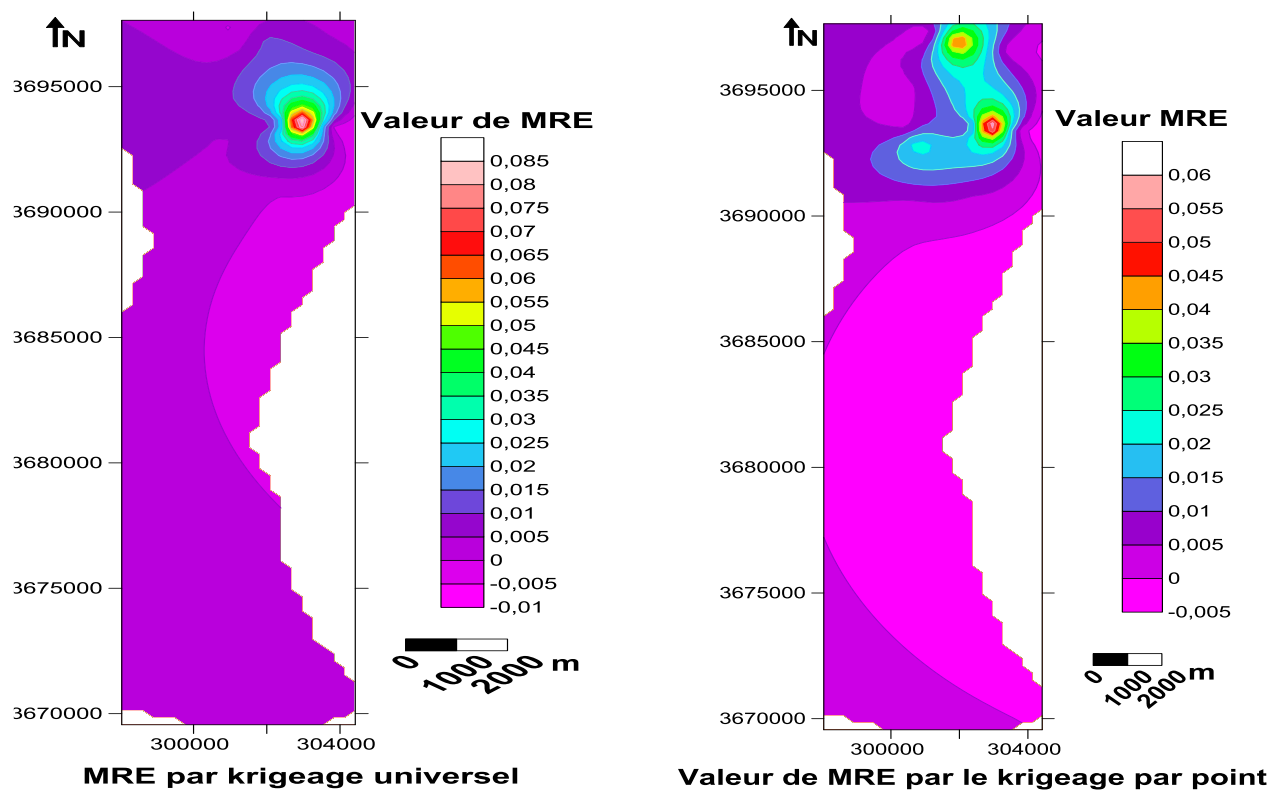


Figure 58: Cartes de distribution des erreurs d'interpolation (MRE) pour chaque méthode

L'analyse de la figure 58 montre que les deux méthodes du krigeage soit universel soit par point présentent sommairement une distribution homogène d'une valeur d'erreur généralement très faible (entre 0,005 m et 0,075 m) qui est dépourvue de points de mesure. La moyenne des erreurs du krigeage par point est de l'ordre de 0,01 est plus proche de zéro ce qui traduit que les deux techniques de krigeage est plus précis et moins biaisé. Pour l'ensemble de la zone étude, cette cartographie permet de découvrir que les erreurs moyennes relatives les plus élevées se trouvent généralement au Nord de la zone d'étude.

La figure 59 présente les valeurs de la racine carrée de l'erreur moyenne quadratique (RMSE pour Root Mean Squared Error), intégrant à la fois l'erreur systématique et la dispersion statistique des erreurs de spatialisation.

Pour la technique de krigeage universel, la carte montre relativement que les valeurs de l'ordre de 0,25 occupent presque la moitié de la zone d'étude, ainsi que les

valeurs les plus élevées se localisent au Nord –Ouest de la région d'étude. Par contre la méthode du krigeage par point, on observe que presque la totalité de la surface de la zone d'étude contient des valeurs très faible et de l'ordre de 0,01 ; alors que les valeurs les plus élevées se trouvent dans la partie Nord-est du site d'étude.

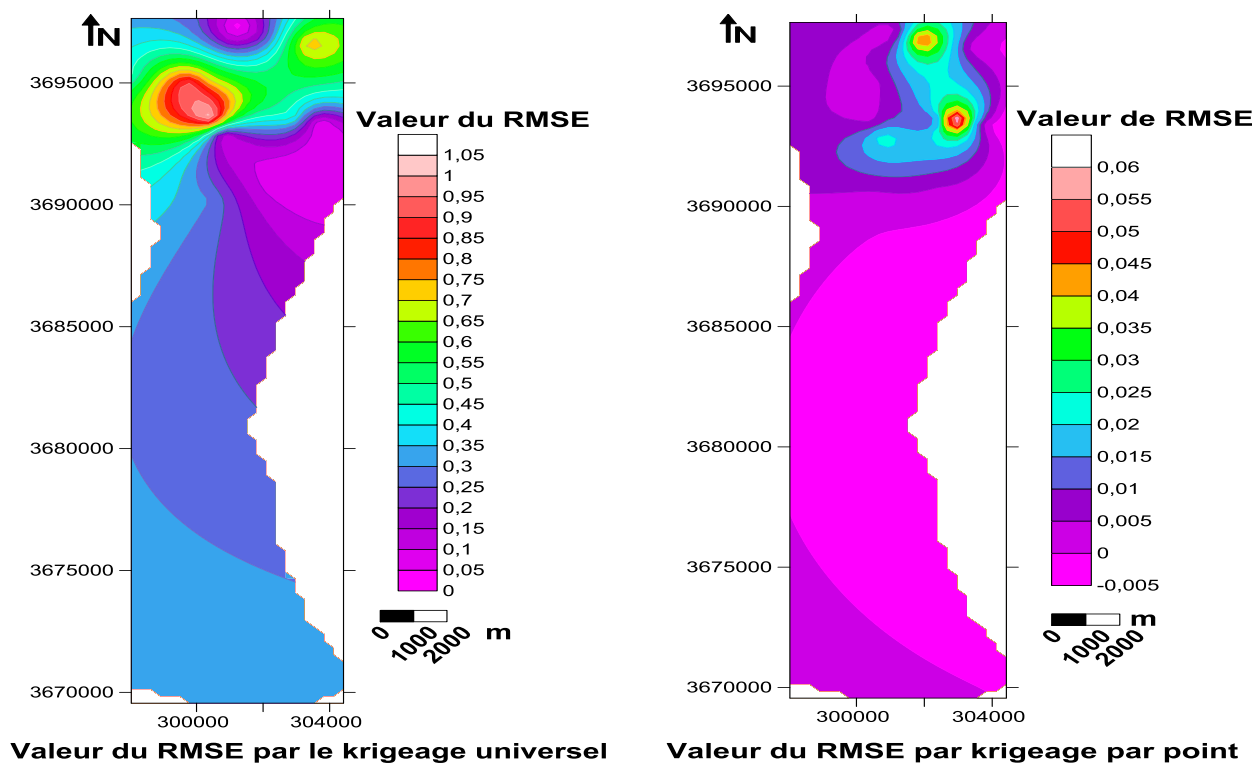


Figure 59: Cartes de distribution des erreurs d'interpolation (MRSE) pour chaque méthode

Par ailleurs, la superposition des nuages des niveaux piézométriques lors de l'interpolation en fonction des valeurs mesurées, pour les deux méthodes, montre que le nuage pour la méthode de krigeage par point et la méthodes du krigeage universel sont plus uniforme , alignés et suivent une droite avec un coefficient de corrélation R de l'ordre de 0,99 (fig. 60). En conclusion, la méthode de krigeage par point et la méthode du krigeage universel s'est révélée plus représentative.

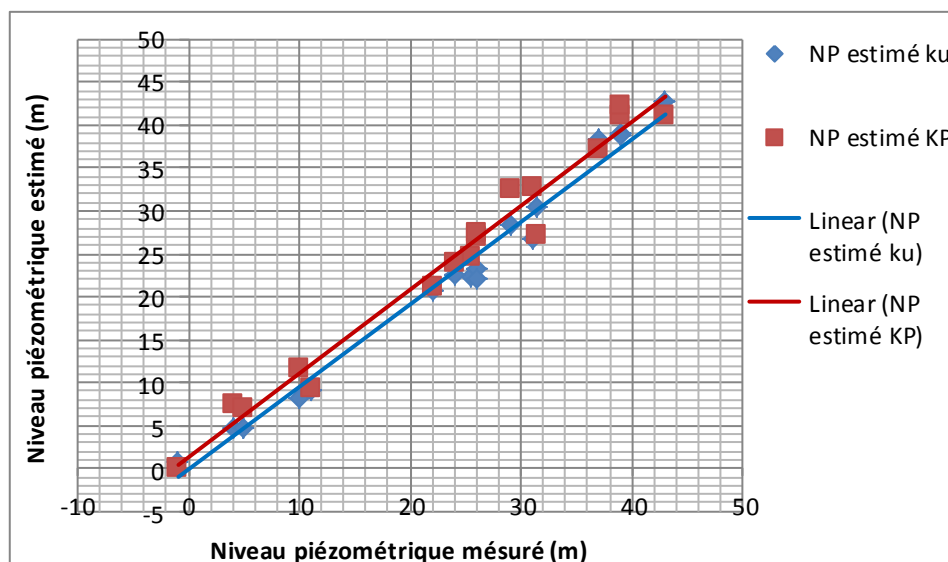


Figure 60: Comparaison graphique entre les valeurs interpolées issues de différentes techniques utilisées avec celles des données observées.

VI.2.2.2.3 Discussion :

D'un secteur à un autre de la zone d'étude les niveaux piézométriques sont différents.

Les deux méthodes d'interpolation (krigeage universel, krigeage par point) présentent globalement les mêmes tendances en matière de spatialisation de la piézométrie. La baisse progressive de la piézométrie observée au Nord de la zone d'étude localité de chott, université est la conséquence d'un mouvement de migration lié à l'activité domestique. Cette action en milieu urbain s'est immédiatement fait sentir puis elle s'est amplifiée au fil des années. Elle se manifeste par de forte densité de population urbaine et rurale ainsi que par un accroissement de la production agricole, elle-même liée à l'augmentation des superficies cultivées. Cette occupation massive du sol (augmentation des superficies cultivées) à entrainer une baisse de la piézométrie sur une grande surface au Nord. Elle entraine, en moyenne une hauteur piézométrique variant de 4 à 32 m et occupe la totalité de la surface de la zone d'étude. On a seulement 10% à 15% de la surface qui reçoit une moyenne piézométrique atteignant les 44 m. En discutant les deux méthodes d'interpolation, on constate que la dispersion garde presque la même répartition spatiale avec les deux méthodes. Quand on regarde la moyenne des erreurs de spatialisation obtenue, on constate que

les deux méthodes du krigeage à une surestimation plus importante. En plus la RMSE de l'interpolation par les deux méthodes de Krigeage par point et universel est plus faible. Donc, on peut dire que l'interpolation par le krigeage est plus efficace. La méthode de krigeage a l'avantage de prévoir et de construire le variogramme expérimental, qui permet de décrire la variabilité moyenne du phénomène dans l'espace (corrélation spatiale). Le krigeage est donc un interpolateur qui prend en compte la structure spatiale du phénomène permettant ainsi d'affiner l'estimation et réduire l'incertitude dans les zones sous-échantillonnées.

Conclusion

Conclusion

Le nombre de données a été de grands secours pour faire une étude concise. La nappe dans la zone d'étude étant fort importante, le procédé de notre étude a été d'abord d'élaborer les cartes piézométriques illustrant le comportement de la charge hydraulique, grâce à la méthode de triangulation linéaire, des données mesurées sur le terrain. Ensuite nous avons effectué une étude variographique.

Pour obtenir de bonnes cartes il a fallu combiner trois modèles mathématiques, cette combinaison a démontré qu'il est possible d'obtenir de très bons résultats pour modéliser au mieux la réalité de notre nappe. Car c'est grâce aux variogrammes modélisés que nous avons pu réaliser le krigeage de la charge hydraulique. Ces dernières sont venues corroborer les cartes piézométriques construites par leurs auteurs. Nous avons remarqué dans ce travail leur quasi-similitude.

Nous avons remarqué que le système du krigeage prend bien en considération les éléments suivants :

- Position relative du domaine à estimer et des points expérimentaux.
- Position relative des points expérimentaux entre eux
- Structure du phénomène à travers le variogramme.

Aussi rappelons les caractéristiques du krigeage qui est :

- Linéaire, sans biais, à variance minimale, par construction.
- Un interpolateur exact.
- Effet d'écran.
- Effet de lissage.
- Transitifs (cohérence des estimés). (MARCOTTE, 2003)

Le système du krigeage et sa variance, ne font intervenir que la structure et la configuration géométrique des données et du domaine à estimer. Cette variance ne

dépend pas des valeurs expérimentales. Et nous avons pu le confirmer, grâce à la réalisation des cartes des valeurs de la charge hydraulique krigées.

La validation croisée nous a permis d'approuver notre modèle de par la corrélation des valeurs mesurées avec celles qui ont été calculées. Nous avons pu, aussi, illustrés des cartes de gradient hydraulique où les valeurs élevées restent les zones d'alimentation qui sont les dômes et les limites géologiques, et les valeurs faibles, les bons endroits pour implanter des ouvrages d'exploitation de la nappe du dans la zone d'étude

Mais ce qui reste le plus intéressant dans ce travail a été la constatation faite en superposant nos deux cartes krigées. La régression de la nappe dans la zone d'étude est significative, et est dénoncée par sa surexploitation. En principe, la baisse de 5m³/m de rabattement de la nappe devrait être prise en compte pour une meilleure gestion de cet aquifère.

Cette étude reste ouverte à d'autres perspectives.

**a. Références
bibliographiques**

- 1- **Abdel-Rahman, 1998.** Etude hydrogéologique de la nappe phréatique de la cuvette d'Ouargla. Rapport interne ANRH-Ouargla.
- 2- **A.N.R.H :** (Agence Nationale des Ressources Hydrauliques de la Wilaya d'Ouargla).
- 3- **Abdel-Rahman, 1998.** Etude hydrogéologique de la nappe phréatique de la cuvette d'Ouargla. Rapport interne ANRH-Ouargla.
- 4- **BENZIAN Imane Fazilet (2009)** étude par krigeage des données piézométriques de la nappe du plateau de Mostaganem / Magistère en Hydrogéologie -Université d'Oran
- 5- **BENCHOUK M., (1994).** Analyse Factorielle Krigeante de Données de Prospection Géochimique Multi-élémentaire ; Prospection de l'Or de Fourou, Mali (Zone sur Echantillonnée Nord-Est). Mém. de Magistère. Ecole Nationale Polytechnique.
- 6- **BOULIFA Khaled (2012):**Synthèse hydrogéologique sur la région d'El-Oued Sahara Nord oriental-Est Algérien. Mémoire de magister université Constantine 1.
- 7- **DALLONI M., (1939).** Géologie appliquée à l'Algérie. Edition MASSON et C^{ie}.
- 8- **D.H.W** (Direction d'hydraulique de la wilaya d'El-Oued).
- 9- **KECHROUD Ali & BOUFISSIOU Mohammed (2021)** la prédiction spatiale par krigeage des propriétés des sols Université Mohamed Boudiaf - M'sila
- 10- **KHACHANA Salim (2007) :** Etude de la gestion intégrée des ressources en eaux dans la vallée d'Oued-Souf (Sud-est) Algérien. Mémoire de magister université Badji Mokhta Annaba.
- 11- **O.N.M :**(Office National Météorologique) Station de Guemar et de Touggourt,
- 12- **MARCOTTE D., (2003).** Krigeage. École Polytechnique - GLQ3401
- 13- **MATHERON G., (1982).** pour une analyse krigeage des données régionalisées. Internal note N°-732. Centre de Géostatistique, Fontainebleau, France.

14- MILOUDI Abd lmonem (2018): Mécanisme et remèdes de la remontée des eaux dans la région d'El-Oued Soufi-impact sur l'environnement de la région-

15- Mehda Smail (2014): Evaluation du risque de la contamination physico-chimique et biologique des eaux souterraines par les polluants d'origine agricole dans la région d'El-Oued.Mémoire de magister université KASDI MERBAH Ouargla.

16- SADRATI N (2005) : Hydrochimie et impact des agglomérations sur les eaux .Mémoire magister université Badji Mokhtar Annaba.

17- ZEROUALI A., EL MESLOUHI M.R., (1994). Elaboration de la vulnérabilité moyennant la méthode DRASTIC et le système d'information géographique (SIG) (cas de la nappe de SOUSS CHTOUKA) Guide book on Mapping Groundwater Vulnerability. Volume n°16 Ed. de l'IAH.

18- ZINE Brahim (2009) : La remontée des eaux souterraines en surface mécanisme et l'impact sur l'environnement (cas d'Oued Souf). Mémoire de magister université El Hadj Lakhd

