

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE



المدرسة الوطنية المتعددة التخصصات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

المدرسة الوطنية المتعددة التخصصات
Ecole Nationale Polytechnique

DÉPARTEMENT : HYDRAULIQUE

Projet de Fin d'Etudes

**En vue de l'obtention du diplôme
d'Ingénieur d'Etat en Hydraulique**

THÈME

**Etude de la Variabilité Spatiale des Paramètres
Hydrogéochimiques par des Méthodes d'Approche
Géostatistique**
application aux données de la région de M'sila

Proposé et Dirigé par :
Mr : A.Semar

Réalisé par :
L.Baali

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE



المدرسة الوطنية المتعددة التخصصات
Ecole Nationale Polytechnique

DÉPARTEMENT : HYDRAULIQUE

Projet de Fin d'Etudes

**En vue de l'obtention du diplôme
d'Ingénieur d'Etat en Hydraulique**

THÈME

**Etude de la Variabilité Spatiale des Paramètres
Hydrogéochimiques par des Méthodes d'Approche
Géostatistique**

application aux données de la région de M'sila

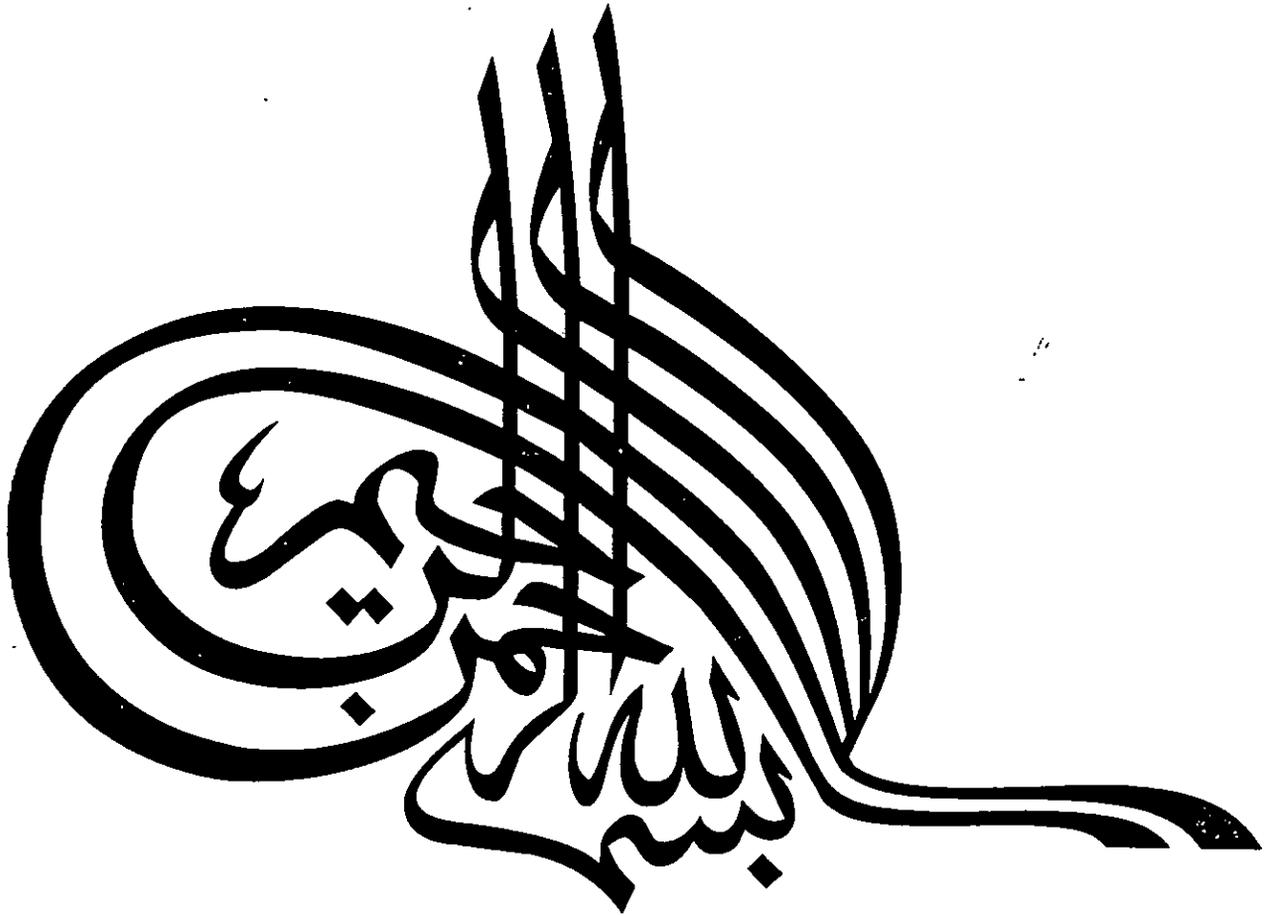
Proposé et Dirigé par :

Mr : A.Semar

Réalisé par :

L.Baali

Année Universitaire : 2000-2001



إهداء

إلى رُوح والدي،

إلى أمي الحبيبة،

إلى إخوتي الأعزاء،

إلى كل الذين عرفتهم خلال دراستي،

إلى أساتذتي الذين ساهموا في تكويني،

إلى كل أعضاء جمعية المعرفة العلمية الثقافية

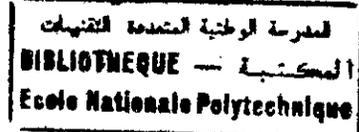
أهدي هذا العمل المتواضع

REMERCIEMENTS

Au terme de cette étude ,je tiens à adresser mes plus vifs remerciements à tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin à réaliser ce travail , en particulier à :

- ❖ Monsieur SEMAR .A mon promoteur pour ses précieux conseils , pour
- ❖ sa patience dans le suivi et la promotion de ce modeste travail .
- ❖ Aux enseignants qui ont contribuer à notre formation , et à l'ensemble des enseignants membres du jury .
- ❖ Madame BENMAMAR ,Monsieur NEBBACHE , Monsieur IDER pour leur service et conseils .
- ❖ Monsieur CHERIFE kamel , pour son aide et sa sympathie .
- ❖ Monsieur NOUIBAT Brahim , Monsieur LATHRACHE Abd'errahmane.

SOMMAIRE



INTRODUCTION

PREMIÈRE PARTIE

CONTENU THÉORIQUE ET FORMALISME DE L'APPROCHE GÉOSTATISTIQUE

CHAPITRE I : MÉTHODES NON PROBABILISTES

L.1 METHODE D'INTERPOLATION LINEAIRE PAR TRIANGULATION :.....	4
L.2 METHODE D'INTERPOLATION POLYNOMIALE :	4
L.3 METHODE D'INTERPOLATION PAR MOINDRES CARREES :.....	5
L.4 METHODE DE PONDERATION :.....	5
A- METHODE DES POLYGONES DE THIESSEN :	5
B- METHODE DE PONDERATION PAR LA DISTANCE :	5
CONCLUSION :.....	7

CHAPITRE II : MÉTHODES PROBABILISTES

II.1 CARACTERES GENERAUX DE LA GEOSTATISTIQUE :	8
II.1.1 DEFINITION :	8
II.1.2 AVANTAGES DE L'APPLICATION DE LA GEOSTATISTIQUE :	8
II.2 NOTIONS DE BASE DE LA GEOSTATISTIQUE :	9
II.2.1 NOTIONS SUR LA THEORIE DES VARIABLES REGIONALISEES :	9
II.2.2 BUT DE LA THEORIE DES VARIABLES REGIONALISEES :	10
II.2.3 NOTION DE MOMENTS :	10
II.2.3.1 Moment d'ordre 1 :	10
II.2.3.2 Moment d'ordre 2 :	10
II.2.4 HYPOTHESE SUR LA FONCTION ALEATOIRE (FA) :	11
II.2.4.1 Hypothèse de Stationnarité :	11
II.2.4.2 Hypothèse d'ergodicité :	12
II.2.4.3 Hypothèse Intrinsèque :	12
II.3 LE VARIOGRAMME :	12
II.3.1 DEFINITION :	12
II.3.2 DETERMINATION DU VARIOGRAMME :	13
II.3.3 CARACTERISTIQUES DU VARIOGRAMME :	14
II.3.3.1 Comportement du Variogramme au Voisinage de Zéro :	14
II.3.3.2 Comportement aux Grandes Distances :	15
A- VARIOGRAMME BORNÉ :	15
B- VARIOGRAMME NON BORNE :	16
II.3.3.3 Comportements Particuliers du Variogramme :	17
II.3.4 MODELISATION DU VARIOGRAMME :	17
II.3.4.2 Vérification de la Validité du Modèle :	19
II.4 LE KRIGEAGE :	19
II.4.1 KRIGEAGE SIMPLE EN COVARIANCE :	19
II.4.2 CALCUL DE LA VARIANCE D'ESTIMATION :	21
II.4.3 KRIGEAGE UNIVERSEL :	21
CONCLUSION :	21

DEUXIÈME PARTIE

PRÉSENTATION DU MILIEU PHYSIQUE

CHAPITRE I : SITUATION GÉOGRAPHIQUE ET CONDITIONS CLIMATIQUES

I.1 SITUATION GEOGRAPHIQUE : 23

I.2 CONDITIONS CLIMATIQUES : 23

 I.2.1 PRECIPITATIONS : 23

 I.2.2 TEMPERATURE : 23

 I.2.3 EVAPOTRANSPIRATION : 27

CONCLUSION : 27

CHAPITRE II : CONTEXTES GÉOMORPHOLOGIQUE ET GÉOLOGIQUE

II.1 GEOMORPHOLOGIE : 28

 II.1.1 GEOMORPHOLOGIE DU HODNA : 28

 II.1.2 GEOMORPHOLOGIE LOCALE : 28

II.2 APERÇU GEOLOGIQUE : 29

 II.2.1 STRATIGRAPHIE : 29

 II.2.2 TECTONIQUE : 31

CHAPITRE III : CADRE HYDROGÉOLOGIQUE

III.1 INTRODUCTION : 33

 III.2 GEOMETRIE DE L'AQUIFERE : 33

III.3 TYPES DES NAPPES : 33

III.4 PIEZOMETRIE : 33

III.5 HYDROCHIMIE : 37

 III.5.1 CONDUCTIVITE ELECTRIQUE (C.E) : 37

 III.5.2 TENEURS EN NITRATES (NO₃) : 37

CONCLUSION : 37

TROISIÈME PARTIE

ANALYSE DES DONNÉES ET INTERPRÉTATION

CHAPITRE I : ÉTUDE STATISTIQUE DES DONNÉES

L1 INTRODUCTION : 39

L2 ACQUISITION ET CRITIQUE DES DONNEES : 39

 L2.1 ACQUISITION : 39

 L2.2 CRITIQUE : 39

L3 EVALUATION DES PARAMETRES STATISTIQUES ELEMENTAIRES : 39

 L3.1 PARAMETRE DE POSITION : 41

 L3.2 PARAMETRES DE DISPERSION : 41

 L3.3 PARAMETRE DE FORME : 42

I.2 AJUSTEMENT AUX LOIS DE PROBABILITES : 45

CHAPITRE II : ÉTUDE VARIOGRAPHIQUE ET KRIGEAGE DES DONNÉES ET INTERPRÉTATION

II.1 VARIOGRAPHIE :	54
II.1.1 CONSTRUCTION DU VARIOGRAMME :	54
II.1.2 MODELISATION DU VARIOGRAMME :	55
II.1.3 VALIDATION DU VARIOGRAMME :	55
II.1.4 INTERPRÉTATION DES CARTES D'ERREURS :	60
II.2 CARTOGRAPHIE ET INTERPRÉTATION :	60
II.2.1 INTERPRÉTATION DE CARTE DES NITRATES :	60
II.2.2 INTERPRÉTATION DE CARTE DE LA CONDUCTIVITE ELECTRIQUE :	65

CONCLUSION GÉNÉRALE

BIBLIOGRAPHIE

ANNEXES

المركز الوطني للدراسات والبحوث
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

INTRODUCTION

Introduction

De nos jours, le problème des ressources en eau mobilisable ne se pose pas uniquement en quantité disponible, la qualité des ces eaux commence à poser de sérieux problème et surtout quand il s'agit des région arides, comme celle de M'sila. En effet, l'explosion démographique et particulièrement urbaine en parallèle avec le développement socio-économique impose la nécessité de la prise en charge du problème de la qualité des eaux.

La mise en évidence de la répartition spatiale de la qualité des eaux de la nappe alluviale du miopliocène nécessite l'emploi de méthodes cartographiques appropriées.

Le but de cette étude est de montrer l'évolution spatiale de la conductivité électrique et de nitrates à travers l'établissement d'une carte, la géostatistique qui est une approche caractérisant la structure de la variable spatiale d'une propriété quelconque ainsi que son estimation a été utilisé comme outil d'analyse et de traitement de données. Elle a fait l'objet de :

- ✓ La caractérisation de la variabilité spatiale de C.E et NO₃ par le biais du variogramme.
- ✓ L'établissement des cartes par l'estimation spatiale en utilisant le krigeage comme technique d'interpolation.

Pour y arriver nous avons adopté la démarche suivante :

Dans la *première partie* intitulé contenu théorique et formalisme de l'approche géostatistique, on donnera un aperçu sur les méthodes d'interpolation déterministes et le fondement théorique des méthodes probabilistes.

La présentation de milieu physique est réservé pour la *deuxième partie*, on exposera la situation géographique, les conditions climatiques, le contexte géomorphologique et géologique et le cadre hydrogéologique de la zone d'étude.

La *troisième partie* consiste à mettre au point de l'application de géostatistique aux grandeurs hydrochimiques de la région de M'sila. Enfin, on donnera une *conclusion générale*.

PREMIERE PARTIE

CONTENU THEORIQUE ET FORMALISME

DE

L'APPROCHE GEOSTATISTIQUE

L'APPROCHE GEOSTATISTIQUE

CHAPITRE I

MÉTHODES NON PROBABILISTES

Il existe une multitude de méthodes d'interpolations déterministes, les plus utilisées sont :

- Méthode d'interpolation linéaire par triangulation ;
- Méthode d'interpolation polynomiale ;
- Méthode d'interpolation par moindres carrées ;
- Méthode de pondération.

Nous donnerons dans ce qui suit, une description sommaire des principes de ces méthodes.

L.1 Méthode d'interpolation Linéaire par Triangulation :

Cette méthode est basée sur l'hypothèse de linéarité du paramètre entre deux points de mesure. Elle consiste à former un réseau de triangles (Castany, 1982). Les sommets sont représentés par les points mesurés les plus proches. Le tracé des courbes iso valeurs se fait entre les points des sommets à travers les côtés de ces triangles.

L.2 Méthode d'interpolation Polynomiale :

La méthode consiste à ajuster, une fonction polynomiale aux données expérimentales X et Y (mesurées) supposées être régulières.

$$Z(x, y) = \sum_{i=1}^n A_i P_i(x, y) \quad (I-1)$$

Où :

$Z(x, y)$: représente l'estimation au point de coordonnées x et y.

A_i : coefficient d'ajustement pour le calcul de valeurs exactes aux points de mesure.

$P_i(x, y)$: Représente le polynôme de degré « i ».

L'utilisation de cette méthode est difficile, car elle suppose que les données sont bien réparties avec une structure régulière, ce qui n'est pas toujours le cas.

I.3 Méthode d'interpolation par Moindres Carrées :

La méthode des moindres carrées est une technique d'interpolation, basées sur une hypothèse, qui considère le phénomène réel est de fait régulier, mais qu'il est affecté d'une erreur $E(x)$ de moyenne nulle et sans autocorrection spatiale.

$$\text{On a: } z(x) = m(x) + E(x) \quad (\text{I-2})$$

Où : $m(x)$ peut prendre un modèle généralement polynomial.

La méthode des moindres carrées consiste à minimiser la somme des carrés des écarts entre la valeur expérimentale et la valeur estimée par le modèle choisi.

$$\Sigma [Z^*(x) - Z(x)]^2 = \text{Minimum} \quad (\text{I-3})$$

I.4 Méthode de Pondération :

Les méthodes de pondération sont un ensemble de techniques basées essentiellement sur une hypothèse d'homogénéité du phénomène. Ces méthodes sont destinées à calculer la valeur d'une variable spatiale $Z(x)$ par la moyenne pondérée des autres valeurs échantillonnées, parmi ces méthodes on peut citer :

- Méthode des polygones de Thiessen ;
- Méthode de pondération par la distance.

a- Méthode des Polygones de Thiessen :

C'est une méthode géométrique assez arbitraire fig.1, elle consiste à déterminer un certain nombre de polygones formés à partir des médiatrices des droites reliant les points adjacents (Reminieras, 1986).

La valeur expérimentale Z est supposée être la moyenne représentative de polygones si :

$$\overline{Z}_i = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} S_i Z_i}{S_T} \quad (\text{I-4})$$

Où : S_i : Surface du polygone élémentaire \rightarrow en m^2

S_t : Surface totale du domaine d'étude \rightarrow en m^2

Z_i : Valeur partielle.

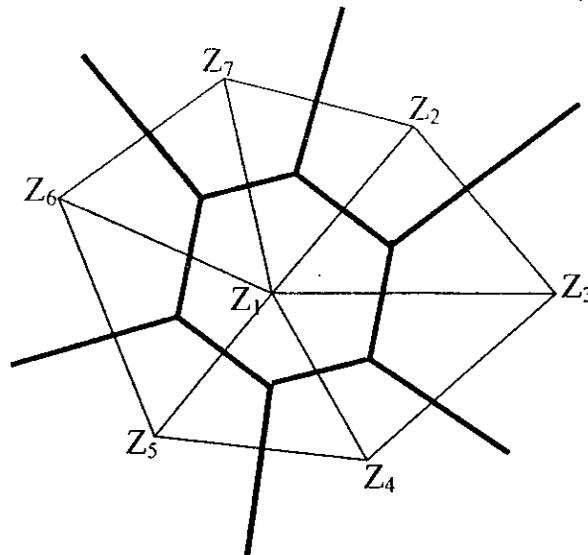


Figure 1 : Polygone de Thiessen

Cette méthode est surtout adaptée à l'estimation des pluies moyennes sur une région, mais elle présente deux inconvénients majeurs :

- L'un dû à sa relative difficulté de mise en œuvre notamment, lorsqu'on a des lacunes de mesures dans certains points ;
- L'autre, c'est qu'elle a été conçue pour être utilisée à grande échelle dans des régions, où le paramètre relief est homogène sans influence marquée d'une dérive.

b- Méthode de Pondération par la Distance :

Dans ce cas la valeur de Z non échantillonnée peut être estimée en fonction de la distance « d » qui sépare Z_0 et les points expérimentaux Z_i .

$$\text{Où : } Z_0 = \frac{\sum g(d_i) Z_i}{\sum g(d_i)} \quad (\text{I-5})$$

Avec : $g(d_i)$: fonction de pondération

d_i : distance séparant le point Z_0 et le point Z_i

On peut citer parmi les fonctions de pondération les plus connues :

$g(d) = 1/d$: interpolation par inverse des distances.

$g(d) = 1/d^2$: interpolation par inverse des carrés des distances.

L'inconvénient majeur des techniques de pondérations par la distance est dû au fait qu'on ne peut pas discriminer l'information redondante.

Conclusion :

Les méthodes non probabilistes présentent des inconvénients lors de l'estimation des phénomènes naturels. Parmi ces inconvénients on cite :

- Les procédés analytiques ne donnent pas la variance de l'estimation pour déterminer l'intervalle de confiance pour chaque valeur estimée ;
- Les méthodes analytiques ne tiennent pas compte de la structure spatiale du phénomène.

Les méthodes géostatistiques, qui seront présentées dans ce qui suit ont des avantages par rapport à ces méthodes usuelles.

CHAPITRE II

METHODES PROBABILISTES

II.1 Caractères généraux de la géostatistique :

II.1.1 Définition :

La géostatistique est l'application du formalisme des fonctions aléatoires à la reconnaissance et à l'estimation des phénomènes naturels.

Au sens le plus large, la géostatistique est l'étude des lois de distribution dans leur champ naturel des variables régionalisées. La théorie de la géostatistique démarre de l'idée que toutes les variables régionalisées ont un aspect aléatoire et structural. Ce sont des fonctions d'espace définies dans un champ homogène (bassin versant, formation géologique,...) à partir d'un support géométrique déterminé (pluviométrie, ou volume du prélèvement).

II.1.2 Avantages de L'application de la Géostatistique :

Parmi les avantages qui représentent les méthode géostatistique, on peut citer :

- L'annulation des méthodes d'interpolation plus ou moins arbitraires ;
- L'application d'un estimateur sans biais ;
- Détermination d'un estimateur optimal, c'est à dire une variance minimale ;
- La quantification des erreurs commises sur les estimations ;
- La prise en considération de la notion du support de l'information ;
- L'utilisation du krigeage permet l'optimisation d'une campagne d'échantillonnage : « la rationalisation d'un réseau de mesure en réduisant le nombre de station et en fixant la fréquence des mesures au niveau optimum et facilité par l'utilisation du variogramme. Le variogramme d'une grandeur qui varie dans le temps ou l'espace montre immédiatement à partir de quelle durée entre deux mesures, ou de quelle distance entre deux points, on est assuré d'une

variance d'estimation donnée, compte tenu des erreurs de mesures », (Valiron, 1992).

II.2 Notions de Base de la Géostatistique :

II.2.1 Notions sur la Théorie des Variables Régionalisées :

Le terme régionalisée a été utilisé pour la première fois par (Matheron, 1965) pour définir un phénomène se déployant dans l'espace (et/ou) dans le temps dont les valeurs varient d'un lieu à un autre avec une apparence de continuité, sans qu'il soit possible de représenter sa variation par une loi mathématique extrapolable. (Figure 2)

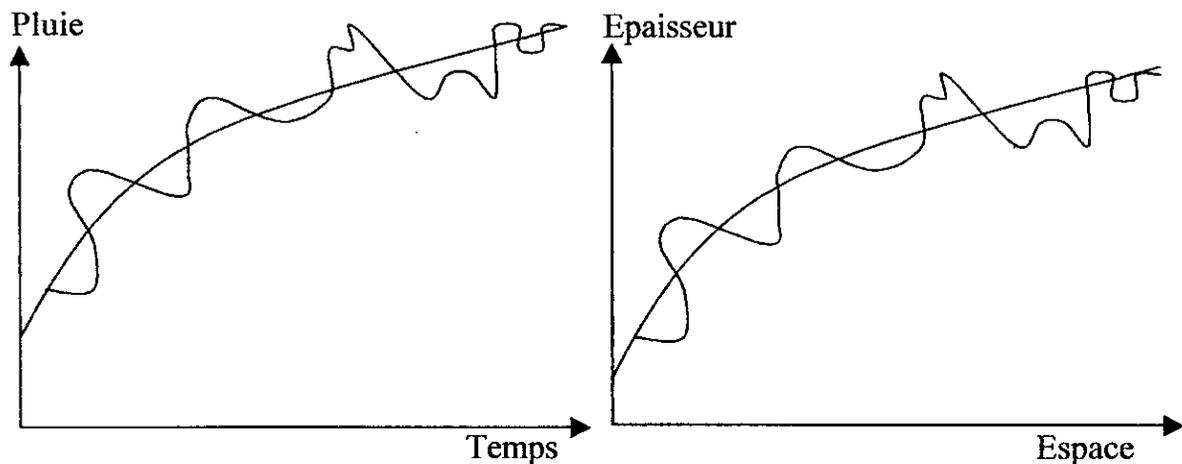


Figure2 : Exemple de Comportement d'une Variable Régionalisée

(Delhomme, 1976)

Ces variables aussi définies ont un double caractères (Journel, 1978) :

- **Aléatoire** : les valeurs numériques peuvent considérablement varier d'un point à un autre de l'espace ;
- **Structuré** : bien que très variable dans l'espace, les valeurs numériques ne soient pas entièrement indépendantes. Par exemple au voisinage d'un sondage riche, on trouvera un minerai riche.

La variable régionalisée, $Z(x)$ est interprétée mathématiquement comme une réalisation d'une fonction aléatoire $Z(x)$ où les réalisations particulières aux points X_i, Y_j distants de h_{ij} sont structurellement dépendantes, où :

X_i : désigne le point (i) aux coordonnées (x_i, y_i).

X_j : désigne le point (J) aux coordonnées (x_j, y_j).

Notations :

$Z(x)$: est utilisée pour la fonction aléatoire (F, A).

$z(x)$: est utilisée pour la variable régionalisée (V, R).

II.2.2 But de la Théorie des Variables Régionalisées :

Matheron 1965 a résumé le but de la théorie des variables régionalisées en trois points essentiels :

- Etablir les bases théoriques permettant de rendre compte des caractéristiques structurales des phénomènes naturels sous une forme mathématiques ;
- La résolution des problèmes d'estimation, qui se posent par des moyens pratiques ;
- Elle englobe toutes les possibilités ayant des surfaces les plus lisses jusqu'aux surfaces les plus accidentées.

II.2.3 Notion de Moments :

II.2.3.1 Moment d'ordre 1 :

Soit la variable aléatoire $Z(x)$ qui décrit le phénomène sur le domaine d'étude. L'espérance mathématique de la variable aléatoire $Z(x)$ est une valeur qui joue le rôle de représentante de la moyenne des valeurs de $Z(x)$. Elle est notée $E\{Z(x)\}$, tel que :

$$E\{Z(x)\} = m(x) \quad (\text{II-1})$$

II.2.3.2 Moment d'ordre 2 :

Les trois moments d'ordre 2 considérés par la géostatistique sont :

- **La Variance** où (l'écart – type) :

Est une mesure de la dispersion (ou de distribution) des valeurs de la variable aléatoire $Z(x)$ autour de la moyenne m . Elle est notée $VAR(Z(x))$, telle que :

$$VAR\{Z(x)\} = VAR\{(Z(x) - m)^2\} \quad (\text{II-2})$$

La racine carrée de la variance est l'écart type et son expression est :

$$\sigma_{Z(x)} = \sqrt{VAR\{Z(x)\}} \quad (\text{II-3})$$

- **La Covariance :**

Si l'on a pour deux variables aléatoires $Z(x_1)$ et $Z(x_2)$ qui ont des variances, elles ont aussi une covariance (journal, 1970).

$$Cov\{Z(x_1), Z(x_2)\} = E\{(Z(x_1) - m_1)(Z(x_2) - m_2)\} \quad (\text{II-4})$$

Remarque :

- Si $Z(x_1)$ et $Z(x_2)$ sont indépendantes alors $Cov\{Z(x_1), Z(x_2)\} = 0$ d'où les deux variables sont dits corrélés.

➤ Si $\{Z(x_1), Z(x_2)\} \neq 0$; alors les deux variables sont dépendantes.

• **La Variogramme :**

Il est défini, comme étant la variance de l'accroissement :

$\{Z(x_1), Z(x_2)\}$. Le variogramme est toujours positif $\gamma(h) > 0$ tandis que la covariance peut présenter des valeurs négatives.

II.2.4 Hypothèse sur la Fonction Aléatoire (FA) :

Une variable aléatoire est une variable qui prend un certain nombre de valeurs numérique selon une certaine loi de distribution de probabilité (Bouhouhou, 1991).

Théoriquement il faut disposer d'un nombre suffisant de réalisation pour l'inférence statistique (Matheron, 1965), or la fonction numérique n'est assez connue ni dans le temps, ni dans l'espace (connue seulement aux points de sondage).

L'inférence apporte des hypothèses sur la fonction aléatoire en enlevant cette impossibilité, mais ces hypothèses restent suffisamment faibles pour englober le maximum de problèmes pratiques (De Marsily, 1981).

Les hypothèses sont :

- Hypothèse de stationnarité ;
- Hypothèse d'ergodicité ;
- Hypothèse intrinsèque.

II.2.4.1 Hypothèse de Stationnarité :

La stationnarité d'un phénomène exprime son homogénéité spatiale qui fait qu'il se répète lui-même en quelque sorte dans l'espace (Delhomme, 1976).

La fonction aléatoire est dite stationnaire au sens stricte, si sa loi spatiale est invariante par translation dans son espace de définition.

Nous avons donc une espérance mathématique qui est constante.

$$E(Z(x)) = m \quad (\text{II-5})$$

La covariance entre les points X_i, Y_j est dépendante uniquement du vecteur distance h séparant les points X_i, Y_j :

$$E[(Z(x_i) - m)(Z(x_j) - m)] = C(x_i, x_j) \quad (\text{II-6})$$

Où :
 x_i : point de coordonnées (x_i, y_i)
 x_j : point de coordonnées (x_j, y_j)
 m : moyenne de $Z(x)$
 $C(x_i, x_j)$: covariance entre les points x_i, x_j

L'hypothèse de stationnarité est très forte elle se vérifie très rarement en réalité, étant donné la capacité de dispersion très grande des phénomènes naturels.

II.2.4.2 Hypothèse d'ergodicité :

Cette hypothèse consiste à supposer que la réalisation unique étudiée suffise à rendre compte de l'ensemble des réalisations éventuelles, elle permet alors de déterminer la loi de probabilité de la fonction aléatoire (F.A) par la connaissance d'une seule réalisation.

On a montré par ailleurs (delhomme, 1976) que pour le développement des calculs d'estimation (krigeage), on n'a pas besoin que la fonction aléatoire soit stationnaire mais uniquement ses accroissements d'ordre 2, c'est ce qu'on appelle : hypothèse intrinsèque.

II.2.4.3 Hypothèse Intrinsèque :

Une fonction aléatoire admet l'hypothèse intrinsèque, si les accroissements de la variable régionalisée $[Z(x+h)-Z(x)]$ sont localement stationnaires, autrement dit l'accroissement : $[Z(x+h)-Z(x)]$ possède une espérance mathématique nulle et une variance indépendante de point x .

$$\text{On a : } \begin{cases} E [Z(x+h) - Z(x)] = 0 \\ \text{Var} [Z(x+h) - Z(x)] = 2\gamma(h) \end{cases} \quad (\text{II-7})$$

Avec :

E : espérance mathématique

Var : variance

$\gamma(h)$: fonction demi-variogramme

La fonction aléatoire est dite fonction aléatoire intrinsèque (F A I). Cette hypothèse est plus faible que la stationnarité.

La théorie des variables régionalisées, fournit ainsi deux outils bien adaptés à l'étude de la variabilité spatiale des paramètres hydrogéologique :

- Le variogramme qui résume la variabilité spatiale ou la structure du paramètre étudié,
- Le krigeage, qui permet l'estimation en prenant en compte l'information structurale synthétisée par le variogramme et donne une prédiction aux points non mesurés avec une précision connue.

II.3 Le Variogramme :

II.3.1 Définition :

Le variogramme est une représentation de la variance entre deux points en fonction de la distance, il nous donne une idée sur la portée du phénomène et sa continuité .

Le variogramme permet de résumer toute l'information structurale de la variable régionalisée (Rossi, 1995 ; Steven, 1996).

Le variogramme d'une fonction aléatoire intrinsèque est défini comme suit :

$$2\gamma(h) = \text{Var} [Z(x_i + h) - Z(x_i)] \quad (\text{II-8})$$

Sous l'hypothèse intrinsèque : $E [Z(x_i + h) - Z(x_i)] = 0$

On obtient :

$$\gamma(h) = 1/2 E [Z(x_i + h) - Z(x_i)]^2 \quad (\text{II-9})$$

Donc $\gamma(h)$ est le demi-accroissement quadratique moyen entre deux points distants de h .

II.3.2 Détermination du variogramme :

Pour un paramètre se déployant dans un espace bidimensionnel, son variogramme expérimental est calculé par l'expression :

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i + h) - Z(x_i)]^2 \quad (\text{II-10})$$

Avec :

$N(h)$: nombre de couples distants de h ;

$Z(x_i + h)$; $Z(x_i)$: valeurs mesurées aux points $x_i + h$, x_i .

Le calcul du variogramme se fait à partir d'un échantillonnage des points de mesures Z_i , en définissant un certain nombre de classe, puis on y range tous les couples formés par les points échantillonnés c'est à dire $n(n-1)/2$ couples, alors on calcule pour chaque classe :

- La distance moyenne h ,
- Le variogramme .

Le nombre de couples présents dans la classe, à ce propos Delhomme (1976) et Hugbreghs (1978) recommandent un certain nombre de couple supérieur à 50 pour chaque classe, et aussi le calcul $\gamma(h)$ nécessite un choix de pas de distance qui ne doit être ni trop petit, ni trop grand, s'il est trop petit, le nombre de couple dans chaque classe de distance sera trop faible pour l'estimation moyenne $\gamma(h)$, par contre s'il est très grand, le calcul prend en compte un nombre de couple important, cela entraîne un effet de lissage excessif du variogramme avec risque de supprimer certaines particularités de la structure spatiale de la variable. A ce propos Voltz (1986) et Gaşciel (1991) proposent une distance maximale qui ne doit pas dépasser le seuil défini par la moitié de la plus grande longueur de la surface d'échantillonnage.

L'expérience a montré qu'aux distances supérieures à cette limite, le variogramme expérimental calculé diverge du variogramme théorique.

II.3.3 Caractéristiques du Variogramme :

Le variogramme est un modèle mathématique qui sera utilisé pour la résolution de tous les problèmes pratiques posés en géostatistique, il s'avère donc nécessaire de connaître quelques propriétés de cet outil.

II.3.3.1 Comportement du Variogramme au Voisinage de Zéro :

Le Comportement du variogramme au voisinage de zéro (origine rend compte de la régularité et de la continuité dans l'espace de la variable étudiée).

Par ordre de régularité décroissante on distingue quatre types de comportements à l'origine de $\gamma(h)$:

- Discontinuité à l'origine : Théoriquement on devrait avoir $\gamma(h) = 0$ pour $h = 0$, mais fréquemment présente une ordonnée à l'origine non nulle, cette quantité signifie l'effet de pépité (Fig.3-1). cet effet de pépité est dû soit :
 - A une micro régionalisation.
 - A des erreurs de mesures.
- L'allure parabolique, dérivable et continue à l'origine (Fig.3-2), indique une variable à haute continuité.
- La variable est moins régulière si l'allure du variogramme est à l'origine linéaire, continue en moyenne quadratique, (Fig.3-3).
- L'aspect plat ou effet de pépité pur, dans ce cas, la fonction $\gamma(h)$ se réduit à une droite parallèle à l'axe de distance, c'est à dire que les observations $Z(x+h)$ et $Z(x)$ sont sans autocorrélation, quelque soit la distance qui les sépare (Fig.3-4).

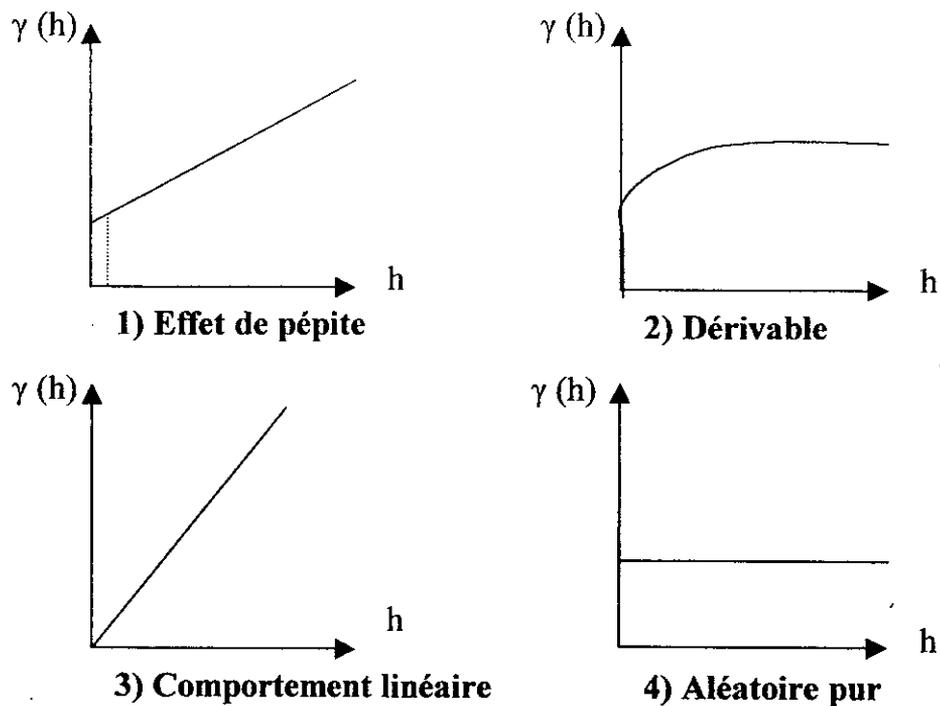


Figure 3 : Comportements du Variogramme à l'origine.

II.3.3.2 Comportement aux Grandes Distances :

Quand la distance h devient grande, le variogramme peut présenter deux (02) aspects à savoir :

a- Variogramme Borné :

Dans ce cas, le variogramme se stabilise autour d'une valeur limitée appelée palier qui correspond à la variance et la distance à laquelle ce palier est atteint est appelée portée (Fig.4).

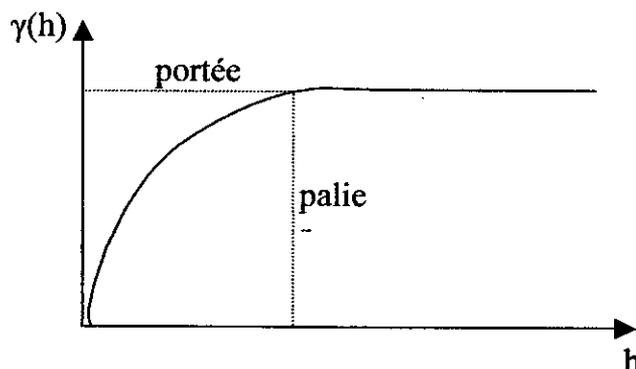


Fig.4 : Variogramme Borné

b- Variogramme Non borné :

Le variogramme non borné indique que le champ a une variance infinie, et qu'une fonction de covariance n'existe pas, seule l'hypothèse intrinsèque est ici acceptable (Fig.5).

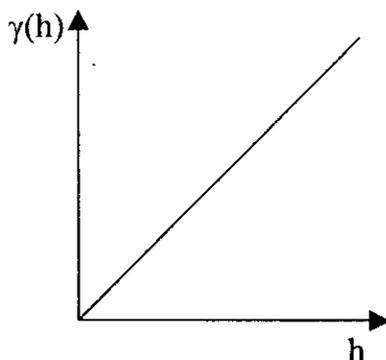


Fig.5 : variogramme non borné

Remarque :

Lorsque le variogramme est borné on montre que la covariance est simplement la symétrie avec une translation (Beucher, Delhomme, De Marsily, 1981), (Fig.6).

Quand la covariance existe, le variogramme existe et ces deux outils structuraux équivalents se déduisant l'un de l'autre par la relation suivante :

$$\gamma(h) = C(0) - C(h) \tag{II-11}$$

Où : $\gamma(h)$: variogramme à la distance

$C(h)$: Cov $\{Z(x_i+h) - Z(x_i)\}$,

$C(0)$: Covariance totale $\gamma(\infty)$; $C(0)$ palier.

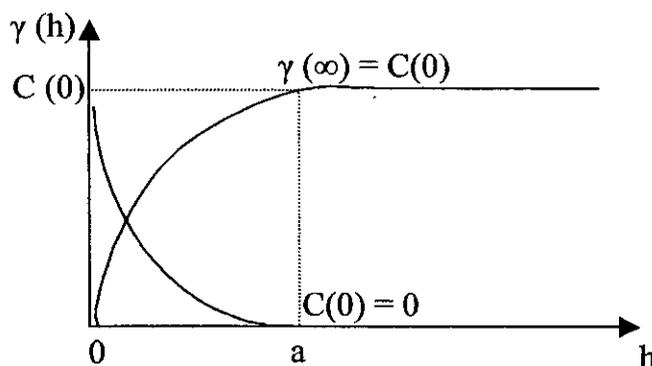


Figure 6 : Covariancé et variogramme

II.3.3.3 Comportements Particuliers du Variogramme :

Le variogramme peut présenter d'autres allures particulières, on peut citer :

- Comportement périodique (Fig.7).
- Structures gigognes (Fig.8).
- Effets de trou (Fig.9).

Le comportement du variogramme (Fig.9), indique l'existence de corrélation négative due à la présence des zones pauvres entourées par des zones riches (Delhomme, 1976).

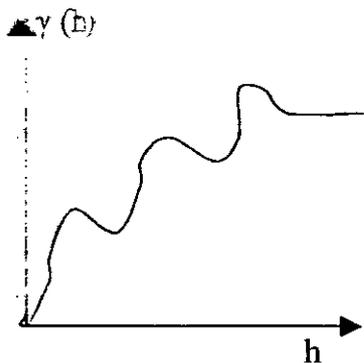


Fig.7 : Structures Périodiques

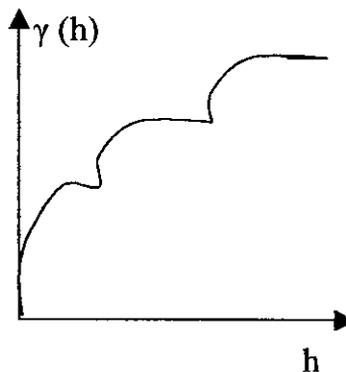


Fig.8 : Structures Gigognes

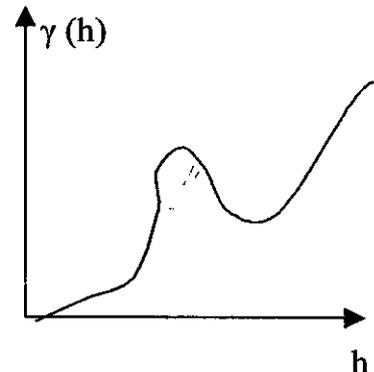


Fig.9 : Effet de Trou

II.3.4 Modélisation du Variogramme :

II.3.4.1 Modélisation du Variogramme Expérimental :

Pour pouvoir bien exploiter le variogramme et d'en tirer le maximum d'informations sur la structure du phénomène, il est nécessaire d'ajuster le graphe du variogramme par un modèle théorique connu.

Les modèles d'ajustements du variogramme les plus fréquents utilisés sont :

- **Modèle Linéaire en h^2 :**

$$\gamma(h) = \omega [h^2]$$

Le modèle linéaire est un modèle sans palier (Fig.10).

- **Modèle Sphérique :**

$$\gamma(h) = \omega [3/2 h/a - 1/2 (h^3)/a] \quad \text{pour } h \leq a$$

et :

$$\gamma(h) = \omega \quad \text{pour } h > a$$

Ce modèle présente un schéma de transition à palier avec un comportement linéaire à l'origine (Fig.11).

• **Modèle Exponentiel :**

$$\gamma(h) = \omega [1 - \exp(-h/a)]$$

C'est un schéma de transition à palier avec un comportement linéaire (Fig.12)

• **Modèle Gaussien :**

$$\gamma(h) = \omega [1 - \exp(-h/a)^2]$$

Il présente un schéma de transition à palier avec un comportement parabolique à l'origine (Fig.13).

Où : $\gamma(h)$: variogramme ;

Ω : représente le palier de la fonction variogramme ;

a : représente la portée du variogramme ;

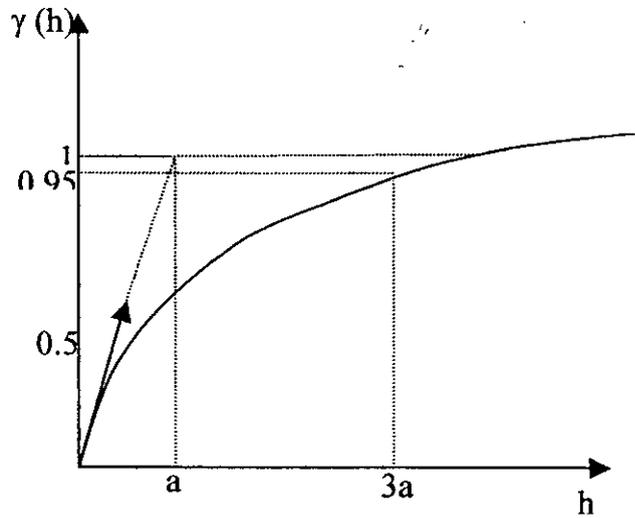
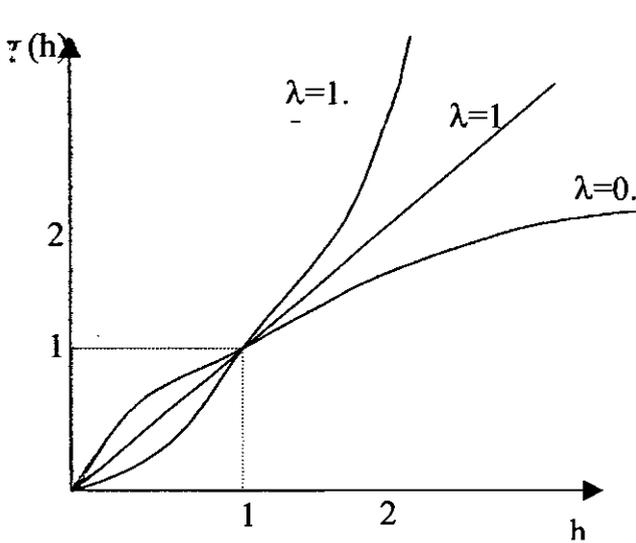


Fig.10 : Modèle linéaire en h^2 $y(h) = \omega[h^\lambda]$ Fig.12 : Modèle exponentiel en h^2 $y(h) = \omega(1 - \exp(-h/a))$

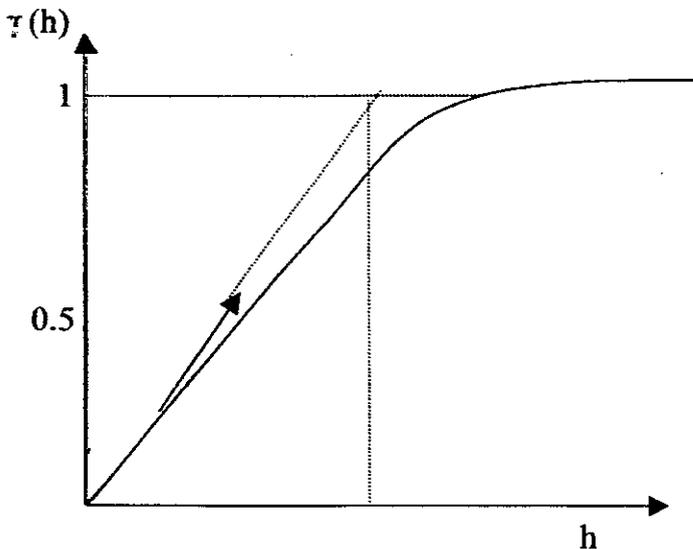


Fig.11 : modèle sphérique $h = \omega$

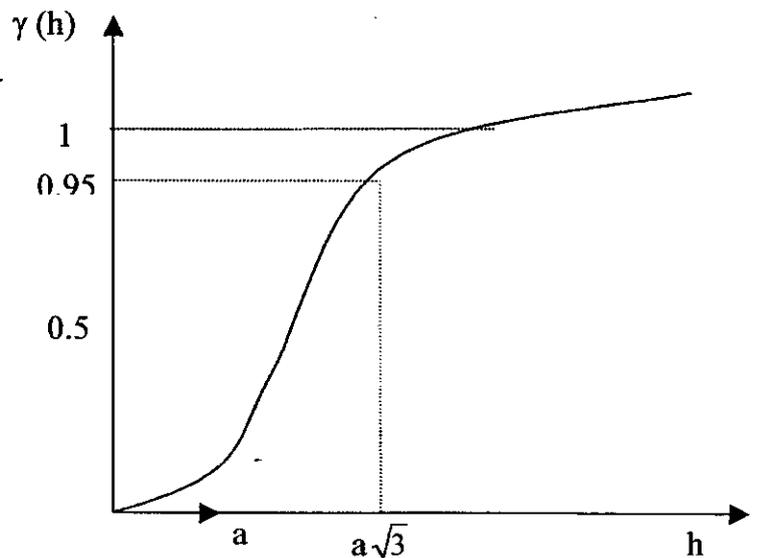


Fig.13 : Modèle gaussien

II.3.4.2 Vérification de la Validité du Modèle :

Une fois que le graphe expérimental du variogramme est ajusté à un modèle théorique, il est plus commode de confirmer qu'un tel modèle est adéquat au phénomène étudié, pour être utilisé par la suite dans la résolution du problème d'estimation par krigeage.

Une vérification consiste à estimer par krigeage chaque valeur comme $Z(x)$ par la combinaison linéaire des autres valeurs disponibles. On dispose à la fois de la variance d'estimation théorique du krigeage « σ_k^2 » et de l'erreur expérimentale $[Z^*(x_i) - Z(x_i)]$ en chaque point x_i .

On dit qu'on a un bon ajustement si :

- La moyenne de non biais tend vers 0.

$$m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Z^*(x_i) - Z(x_i)) \rightarrow 0 \tag{II-12}$$

- Le rapport de variance tend vers 1.

$$g = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left[Z^*(x_i) - \frac{Z(x_i)}{\sigma_k} \right]^2 \rightarrow 1 \tag{II-13}$$

Où : σ_k^2 : est la variance du krigeage (variance d'estimation).

II.4 Le Krigeage :

Le krigeage est le deuxième outil défini par la théorie des variables régionalisées. Il s'agit d'une technique d'interpolation qui s'est développée à partir des années 50 par le géologue sud africain Krige (Journel, 1977). Il consiste à estimer une propriété Z en un point non mesuré en proposant un estimateur Z^* formé par une combinaison linéaire des valeurs observées aux points voisins. Il existe plusieurs types :

II.4.1 Krigeage simple en covariance :

C'est le cas où la fonction aléatoire est stationnaire d'ordre Z , c'est à dire :

- l'espérance mathématique existe et est constante :

$$E \{Z(x)\} = m$$

- la covariance pour chaque couple existe et ne dépend que de l'interdistance h ,

$$C(h) = E. \{Z(x), Z(x+h)\} - m^2$$

Le développement du formalisme mathématique de sa théorie qui est étudiée par plusieurs auteurs dont Gascuel Odoux (1984) est reporté en annexe1. Ici nous rappelons seulement ses principales caractéristiques.

Ce type de krigeage s'effectue dans la condition de non-biais, où l'espérance mathématique est supposée être constante et égale à m , et la condition d'optimalité de l'estimateur.

• *Condition de non-biais* : $E \{ (Z^*(x_0) - Z(x_0)) \} = 0$ (II-14)

• *Condition d'optimalité* :

$$\text{Var} [(Z^*(x_0) - Z(x_0))] = 0 \quad \text{minimum} \quad \text{(II-15)}$$

La variance d'estimation doit être minimale.

En développant l'équation (15), et en introduisant la définition du variogramme (voir annexe 1) on obtient :

$$E \{ (Z_0^* - Z_0)^2 \} = \sum_{i=1}^j \sum_{j=1}^n \lambda_i \lambda_j \gamma(x_i - x_j) + 2 \sum_{i=1}^n \lambda_i \gamma(x_i - x_0) \quad \text{(II-16)}$$

Ainsi, la condition d'optimalité est exprimée en fonction du variogramme, sous la condition de non biais ($\sum \lambda_i = 1$), on introduit le multiplicateur de Lagrange (μ) pour obtenir le minimum de $E \{ (Z_0^* - Z_0)^2 \} - \mu/2 (\sum \lambda_i - 1)$, qui s'obtient en annulant les dérivées partielles par rapport à λ_i et μ , ce qui donne :

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{J=1}^n \lambda_J \gamma(x_i - x_J) + \mu = \gamma(x_i - x_0) \\ \sum_{J=1}^n \lambda_J = 1 \end{array} \right. \quad \text{(II-17)}$$

Le système (17) est un système linéaire de (n+1) équation à (n+1) inconnus, à savoir les n poids λ_i et le multiplicateur de Lagrange μ .

On pose :

$$\gamma_{ij} = \gamma(x_i - x_j)$$

Le système (17) , s'écrit sous la forme naturelle suivante :

$$\begin{bmatrix} 0 & \gamma_{12} & \gamma_{13} & \dots & \gamma_{1n} & 1 \\ \gamma_{21} & 0 & \gamma_{23} & \dots & \gamma_{2n} & 1 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot & \cdot \\ \gamma_{n1} & \gamma_{n2} & \gamma_{n3} & \dots & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & \dots & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \lambda_n \\ \mu \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \gamma_{10} \\ \gamma_{20} \\ \cdot \\ \cdot \\ \gamma_{n0} \\ 1 \end{bmatrix}$$

Avec : $\gamma_{ii} = \gamma(0) = 0$

Le variogramme étant défini positivement, ce système possède une solution unique. Pour déterminer la valeur interpolée par krigeage simple au point x_i on remplace les λ_i calculées dans l'expression de l'estimateur.

II.4.2 Calcul de la Variance d'estimation :

En remplaçant l'expression (17) dans l'équation (16) on obtient :

$$Var(Z_0^* - Z_0) = E\left\{(Z_0^* - Z_0)^2\right\} = \sum_{i=1}^n \lambda_i \gamma(x_i - x_0) + \mu \quad (\text{II-18})$$

L'écart type sera donné par :

$$\sigma_k = \sqrt{Var(Z_0^* - Z_0)} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \lambda_i \gamma(x_i - x_0) + \mu} \quad (\text{II-19})$$

La connaissance de la variance d'estimation donnée par l'équation (18) n'est pas suffisante pour déterminer l'intervalle de confiance de l'estimateur. Dans l'hypothèse de la loi de distribution normale (Gaussienne) des erreurs d'estimation, l'intervalle de confiance à 95 % s'écrit :

$$Z_0 = Z_0^* \pm Z\sigma = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z_i \pm \sigma \quad (\text{II-20})$$

II.4.3 Krigeage Universel:

Certains propriétés du milieu naturel peuvent présenter un gradient ou dérive se traduisant par une tendance. C'est le cas lorsque ni la variance ni la covariance ne peut être définies.

Conclusion :

L'approche géostatistique se manifeste à travers la théorie des variables régionalisées qui se fixe comme objectifs de caractériser la structure spatiale des phénomènes naturels sous une forme mathématique appropriée et résoudre le problème d'estimation à partir d'un échantillonnage donné.

DEUXIEME PARTIE

PRESENTATION

DU

MILIEU PHYSIQUE

CHAPITRE I

SITUATION GEOGRAPHIQUE ET CONDITIONS CLIMATIQUES

L1 Situation géographique :

Le bassin du Hodna est situé à environ 150 km à vol d'oiseau au sud-est de l'Algérie. Il est limité au Nord par les monts des Hodna, les hauts plateaux sétifiens et la dépression Sud-Bibanique, à l'Ouest par les hautes plaines Algéroises et l'Atlas saharien, au Sud et à l'Est par le prolongement de l'Atlas saharien.

Sa superficie est d'environ 25843 km² (A.N.R.H, 1998), tandis que le Chott proprement dit, allongé Est-Ouest sur 70 km avec une largeur moyenne de 14 km.

Il couvre des terrains fortement salés et constitue au milieu de ce bassin hydrogéologique fermé en fond plat d'environ 1150 km² (A.N.R.H, 1998) et d'altitude voisinant les 400m. fig.14 et fig.15.

La région de M'sila, région d'étude est située dans la partie Nord du Chott (fig.16).

L2 Conditions climatiques :

L2.1 Précipitations :

Au niveau du bassin du Hodna, la pluviométrie diminue généralement de la périphérie vers le Chott. Elle atteint 500 mm/an au niveau des reliefs septentrionaux (Monts du Hodna) et diminue jusqu'à 150 mm/an au niveau du Chott passant par 205 mm/an à M'sila (F.A.O, 1973, in Lakroune, 1999).

Dans la région de M'sila, le régime pluviométrique se caractérise par une irrégularité des précipitations. Notons en fin que la moyenne annuelle est de 197.7 mm, où on constate qu'il y a une diminution d'environ 50 mm par rapport à la période 1967- 1973 (Lakroune, 1999).

L2.2 Température :

La température est un facteur important à connaître, car elle influe sur la minéralisation de l'eau.

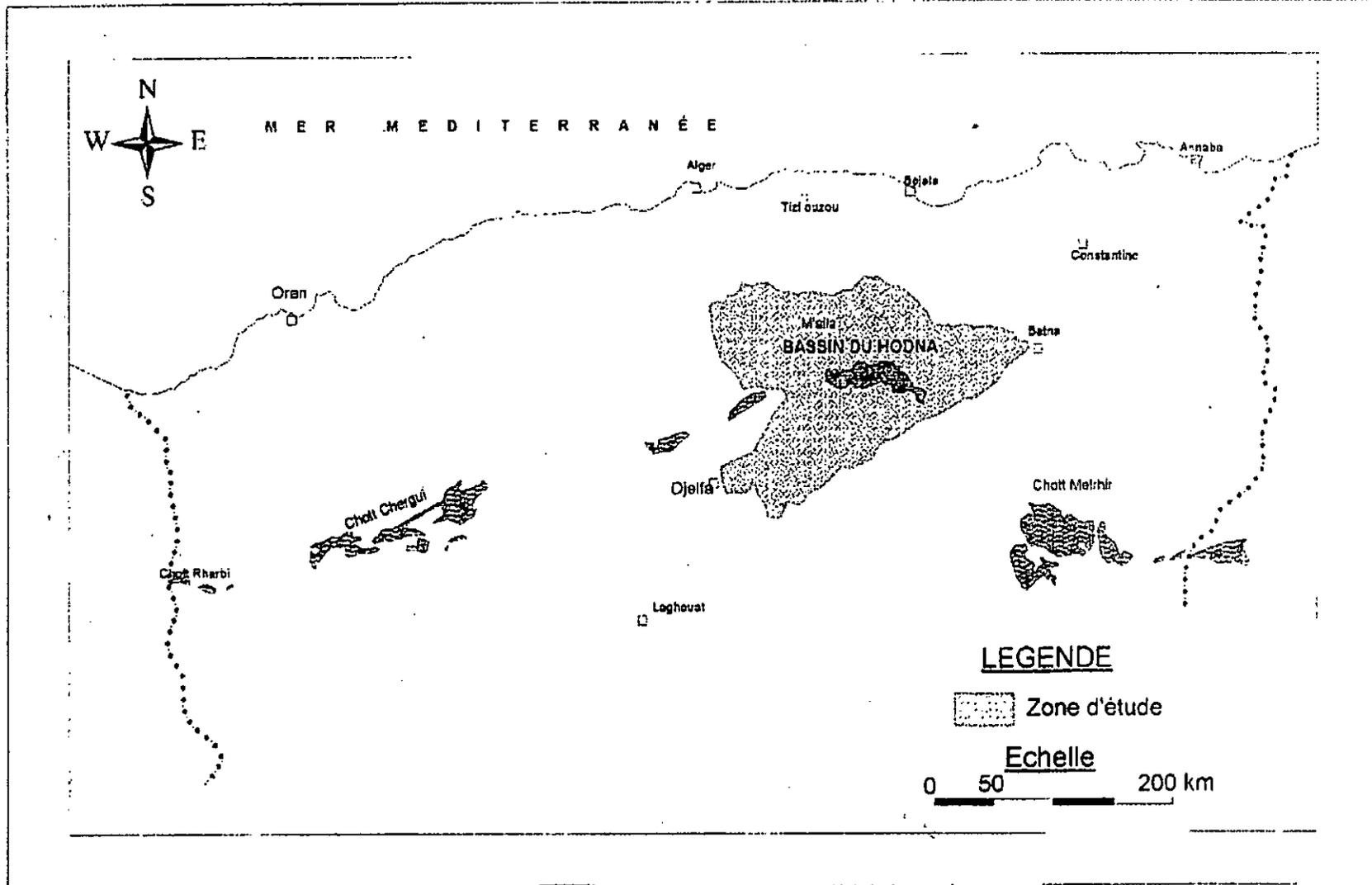


Figure 14. Situation géographique de bassin du Hodna

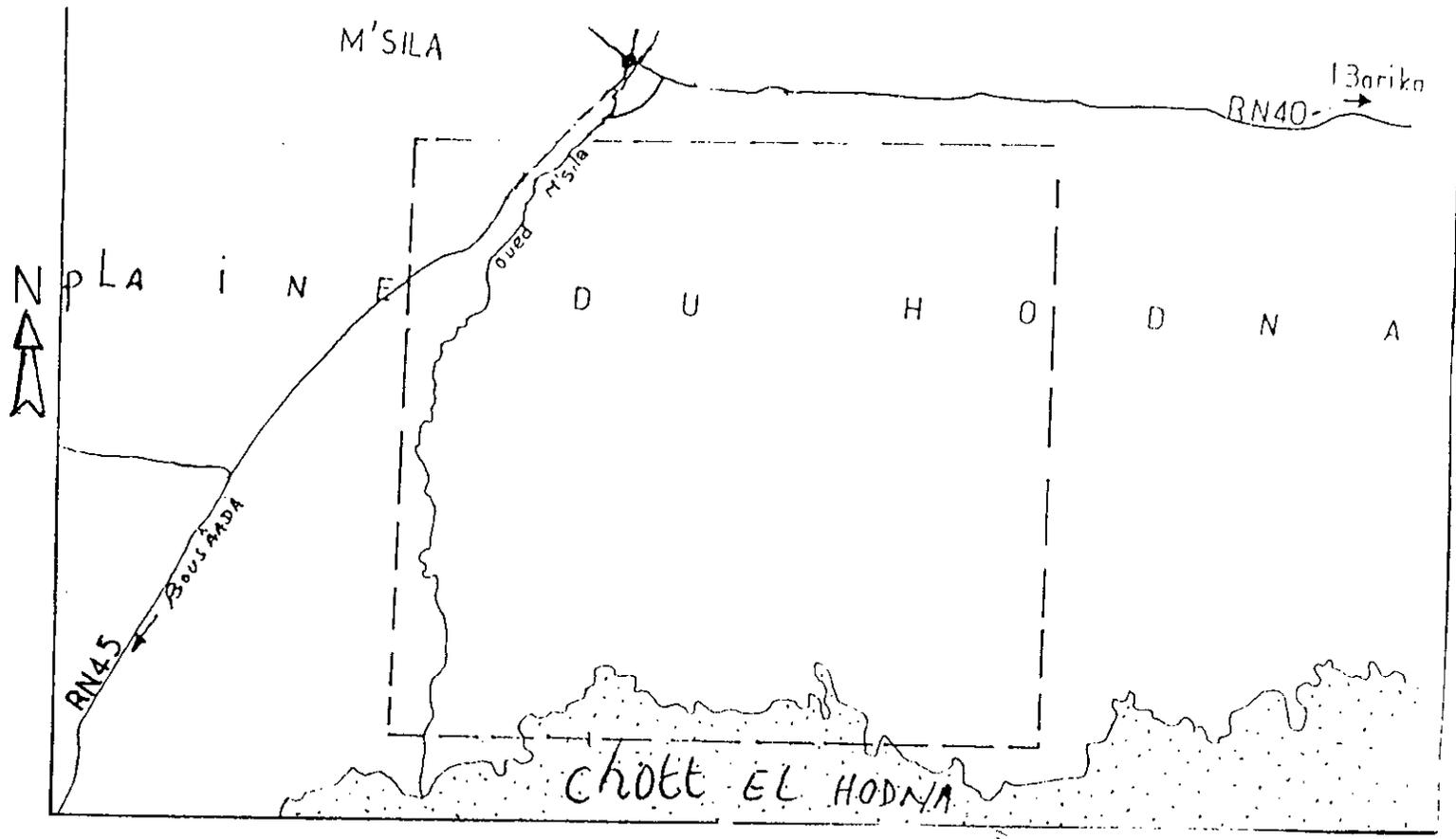


Figure 16 : Carte de situation de la zone d'étude. Echelle

En terme de température moyenne, le mois le plus froid est janvier (8.6 °C), et Août est le plus chaud (31° C). La moyenne annuelle en dix ans (1988-1997) est de 18.9° C.

I.2.3 Evapotranspiration :

L'EvapoTranspiration Potentielle (ETP) peut être calculer à partir de plusieurs formules, elle est estimée par la méthode de **Thornthwaite** au niveau de la station de M'SILA, l'évapotranspiration potentielle la plus élevée est de l'ordre de 214.70 mm au mois de juillet, par contre le mois de janvier enregistre l'ETP la plus faible (11.10 mm).

L'évapotranspiration réelle calculée par la méthode de **Turc** donne une valeur de 203.80 mm pour la période (1988- 1997).

Remarque :

Notons que les données climatiques rapportées sur le présent document sont tirées du mémoire de Lakroune (1999).

Conclusion :

Avec des précipitations moyennes annuelles de 197.7 mm et des températures moyennes annuelles de 18.9°C, la région de M'sila appartient à un climat aride inférieur avec un hiver tempéré.

CHAPITRE II

CONTEXTES GEOMORPHOLOGIQUES ET GEOLOGIQUES

II.1 Géomorphologie :

II.1.1 Géomorphologie du Hodna :

Les sols du Hodna ont pratiquement toute une formation colluvionnaire, alluvionnaire ou éolienne.

La description géomorphologique du Hodna est empruntée à l'étude de « Capolini. J et Sary. M » citée par Dekkiche (1974) intitulée : « Groupements des dépôts quaternaires dans les principales unités géomorphologiques ». cette étude à permis de distinguer quatre (4) grandes unités géomorphologiques :

- Cônes et glacis d'accumulation à matériau grossier : Elle correspond aux quaternaire ancien et moyen, et se rencontre essentiellement au piedmont t méridional des monts du Hodna (Nord du Chott), ainsi qu'à l'Est au piedmont des Djebel Belezma et Djebel Metlili. Cette unité est caractérisée par la présence de croûtes et de gros galets calcaires ainsi que des croûtes gypseuses.
- Glacis d'accumulation et d'épandage à matériau fin : Elle renferme les glacis du quaternaire récent, et caractérisée par des enrichissements essentiellement calcaires sous forme diffuse, ainsi que des enrichissements calcaro-gypseux ou uniquement gypseux. Les matériaux du quaternaire récent étant plus fin que ceux du moyen et ancien, du fait que les accumulations se superposent au lieu de s'emboîter (cas des matériaux grossiers : croûtes, blocs...).
- Les formes à matériau éolien : Cette unité se localise surtout au Sud, Sud- Est et à l'Ouest du Chott El- Hodna, le matériau est essentiellement du sable de toutes catégories ainsi que du limon.
- Les étendues Chotteuses : Les argiles gypso-salines constituent le matériau principal de cette unité. En plus du Chott el-Hodna on y rencontre d'autres dépressions Chotteuses tels que : Chott el-Hamam et Chott M'Doukal.

II.1.2 Géomorphologie locale :

La région de M'sila se caractérisant par un relief plat, fait partie de l'une des grandes plaines du Hodna, elle se caractérise aussi par des glacis d'accumulation et d'épandage à matériau fin qui correspondent aux glacis du quaternaire récent qui présentent des accumulations riches sous forme diffuse ainsi que des accumulations calcaro-gypseuses ou gypseuses.

L'érosion linéaire du matériau fin, fait que les accumulations se superposent.

II.2 Aperçu géologique :

« La géologie des formations lithostratigraphiques par les caractéristiques des matériaux et la structure du sous-sol, celles-ci déterminent, complétées par des informations sur l'eau souterraine, les formations hydrogéologiques (Castany, 1982).

Le bassin du Hodna est une zone où interfèrent les domaines telliens et sahariens, ce qui entraîne une grande variation du faciès et une tectonique complexe (fig 17).

Les descriptions stratigraphiques, les reconstitutions paléogéographiques et les principaux traits tectoniques exposés dans cette étude sont tirés des travaux de Dekkiche (1974), Guiraud (1990) et Derkoy (1973).

II.2.1 Stratigraphie :

• Le Trias :

Dans les régions qui entourent la dépression Hodnéenne, les affleurements triasiques sont assez nombreux, mais n'apparaissent qu'en certains points du bassin du Hodna. Ils sont représentés principalement par des évaporites, argiles, marnes et minéraux de néoformation, des lambeaux calcaro-dolomique, ainsi que des roches volcaniques.

• Le Jurassique et le Berriasien carbonaté :

Ils n'occupent que des surfaces réduites dans le bassin du Hodna. Le Jurassique inférieur et moyen constituent l'ossature, essentiellement calcaro-dolomitique, de plusieurs chaînes des monts du Hodna.

Le Jurassique supérieur (Malm) et le Berriasien, au Djebel Soubella et massif de Boutaleb ainsi qu'aux douars de Taglait et Ouled Tebbene.

• Le Crétacé :

Le Crétacé inférieur présente une alternance de faciès marno-gréseux et argilo-gréseux sur de fortes épaisseurs, le faciès carbonaté est d'importance moindre.

Le Crétacé supérieur est essentiellement marneux et calcaro-dolomitique, ainsi que des dépôts détritiques grossiers.

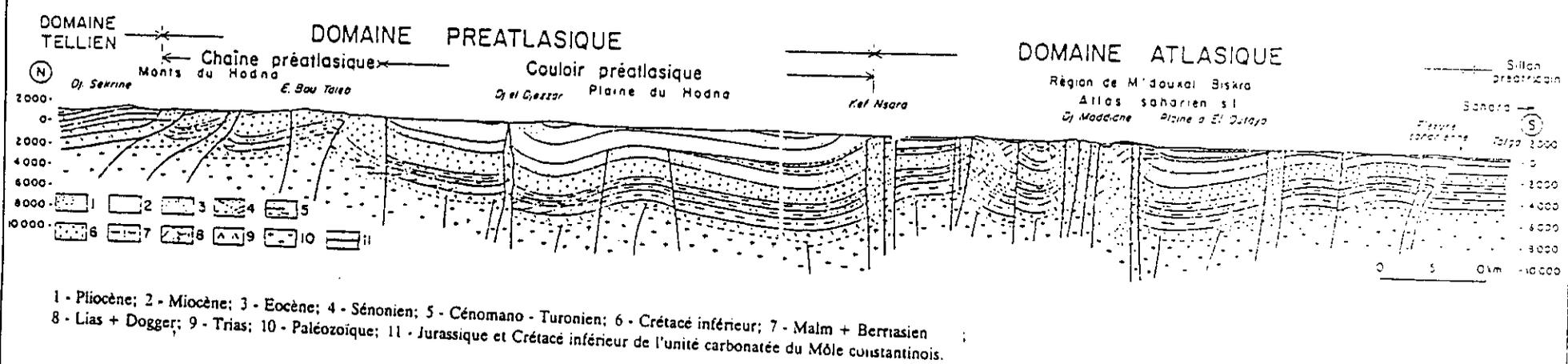


Figure 17: Coupe Géologique à travers le bassin du Hodna. D'après Guiraud, 1990

• Le Paléogène :

Il est présent en deux types de formation :

- Formations autochtones : représentées par l'Eocène de faciès marnes noires et gypses à passées jaunâtres dues à l'alteration de la pyrite.
- Formation allochtones : ce sont les terrains argilo-marno-gypseux d'âge Eocène et Oligocène emballés de façon anarchique au Miocène.

• Le Néogène :

Au Hodna, les terrains néogènes occupent une grande superficie.

• Le Quaternaire :

C'est l'âge pendant lequel ont été formés les Chotts salés des hauts plateaux et du Sahara.

- Le Quaternaire ancien est représenté par des dalles calcaires conglomératiques surmontant localement des argiles sableuses roses ;
- Le Quaternaire moyen comporte trois glacis de piémont (Saletien, Amirien, Tensiftien) généralement étagés ;
- La Quaternaire récente montre des faciès lacustres (sables) du Soltanien, puis de vastes cônes de déjection grossiers du Capsien se déposent (fig. 18).

II.2.2 Tectonique :

Le Hodna constitue un important bassin tectonique se caractérisant par une grande variation de faciès, ceci rendu essentiellement aux monts du Hodna qui constituent l'essentiel des massifs environnants la plaine (Dekkiche, 1974).

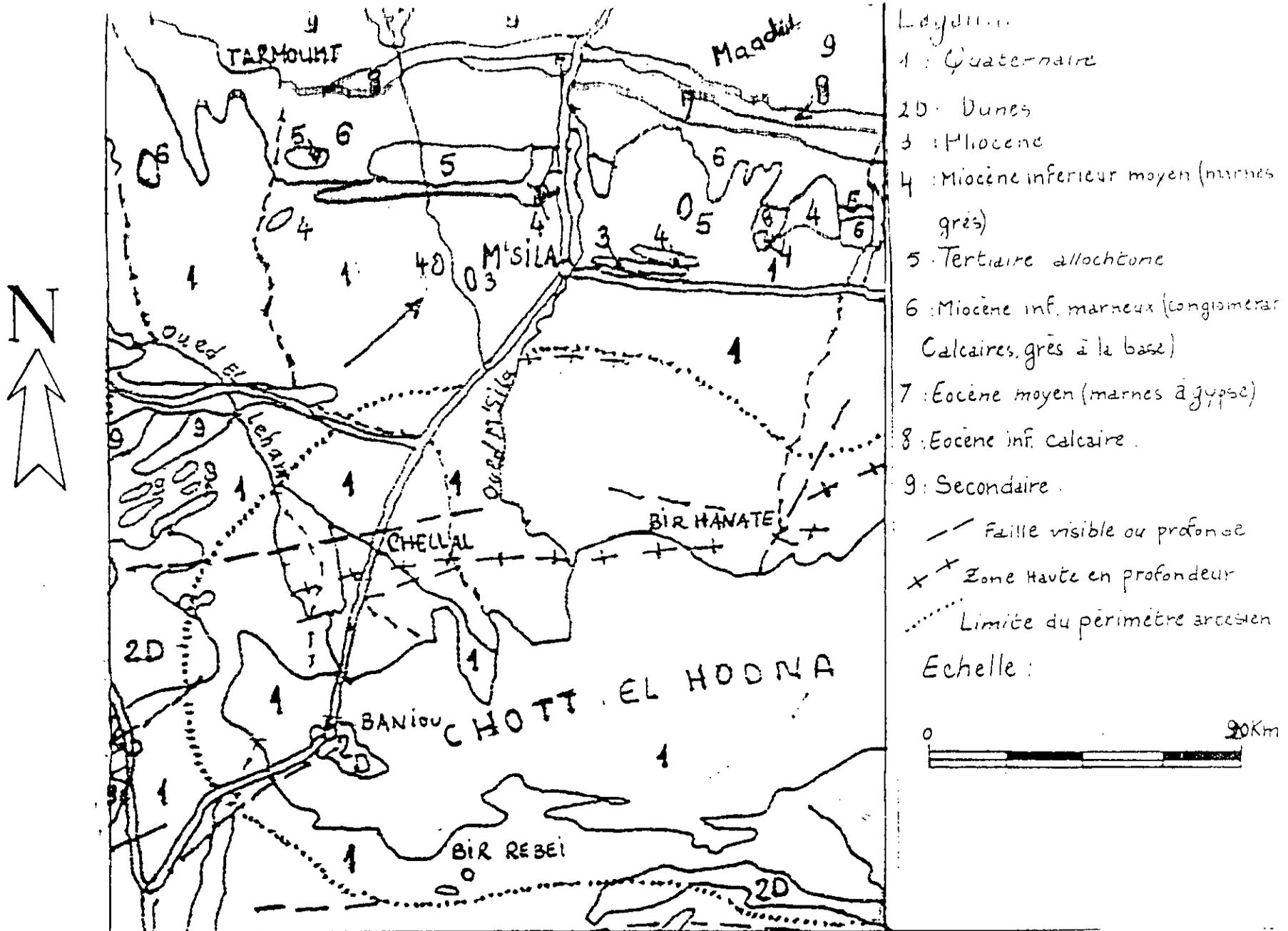


Figure 18 : Schéma structural de la région de M'sila. par Guiraud(Dekkiche, 1974)

CHAPITRE III

CADRE HYDROGEOLOGIQUE

III.1 Introduction :

Dans la région de M'sila, les conglomérats du Pliocène et de la base du Soltanien jouent un rôle important dans la formation des aquifères. La formation quaternaire constitue l'essentiel de l'aquifère superficiel dans la région de M'sila.

Cette formation accuse un faciès géologique hétérogène causé par la présence de lentilles d'argiles imperméables à différents niveaux, ce qui fait que les eaux de l'aquifère soient localement en charge (fig.19) et (fig. 20).

III.2 Géométrie de l'aquifère :

D'après les coupes hydrogéologiques, nous constatons que l'aquifère superficiel est d'autant plus épais qu'on va du Nord au Sud et dépasse 150 m d'épaisseur à plusieurs endroits.

III.3 Types des nappes :

L'aquifère Plio- Quaternaire de M'sila est caractérisé, comme on l'a déjà signalé, par une lithologie hétérogène qui varie entre des formations perméables (ex : graviers) et des formations imperméables (ex : argiles), nous constatons que l'aquifère est généralement libre et localisé dans les formations graveleuses.

III.4 Piezometrie :

Les puits et sondages du premier aquifère rencontré sous la surface du sol, présentent un niveau d'eau dont l'altitude est appelée par convention le niveau piézométrique (H)

Dans notre zone d'étude, des mesures du niveau d'eau ont été réalisées sur plusieurs puits et forages par l'A.N.R.H. (compagne Avril 1995) fig.21.

Selon la carte piézométrique établie par Lakroune(1999) pour la région de M'sila, nous avons constaté l'existence de deux (02) zones à gradients hydrauliques différents : la zone centrale avec un gradient de l'ordre de 1.2×10^{-3} , et les zones Nord -Est et Nord-Ouest avec un gradient de l'ordre de 4×10^{-3} .

ENP 2001

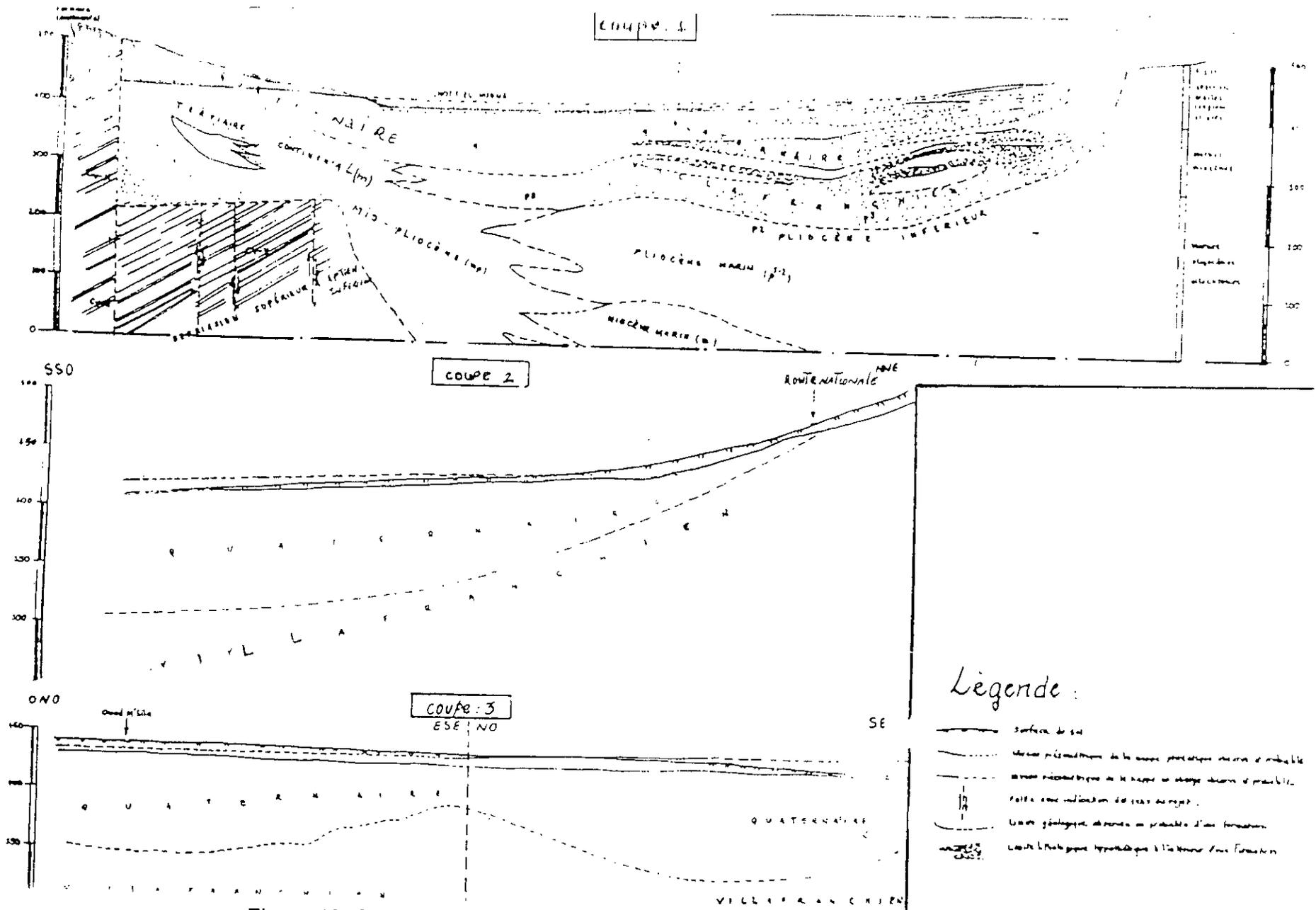


Figure 19: Coupes Hydrogéologiques à travers le Hodna. D'après C.G.G, 1973

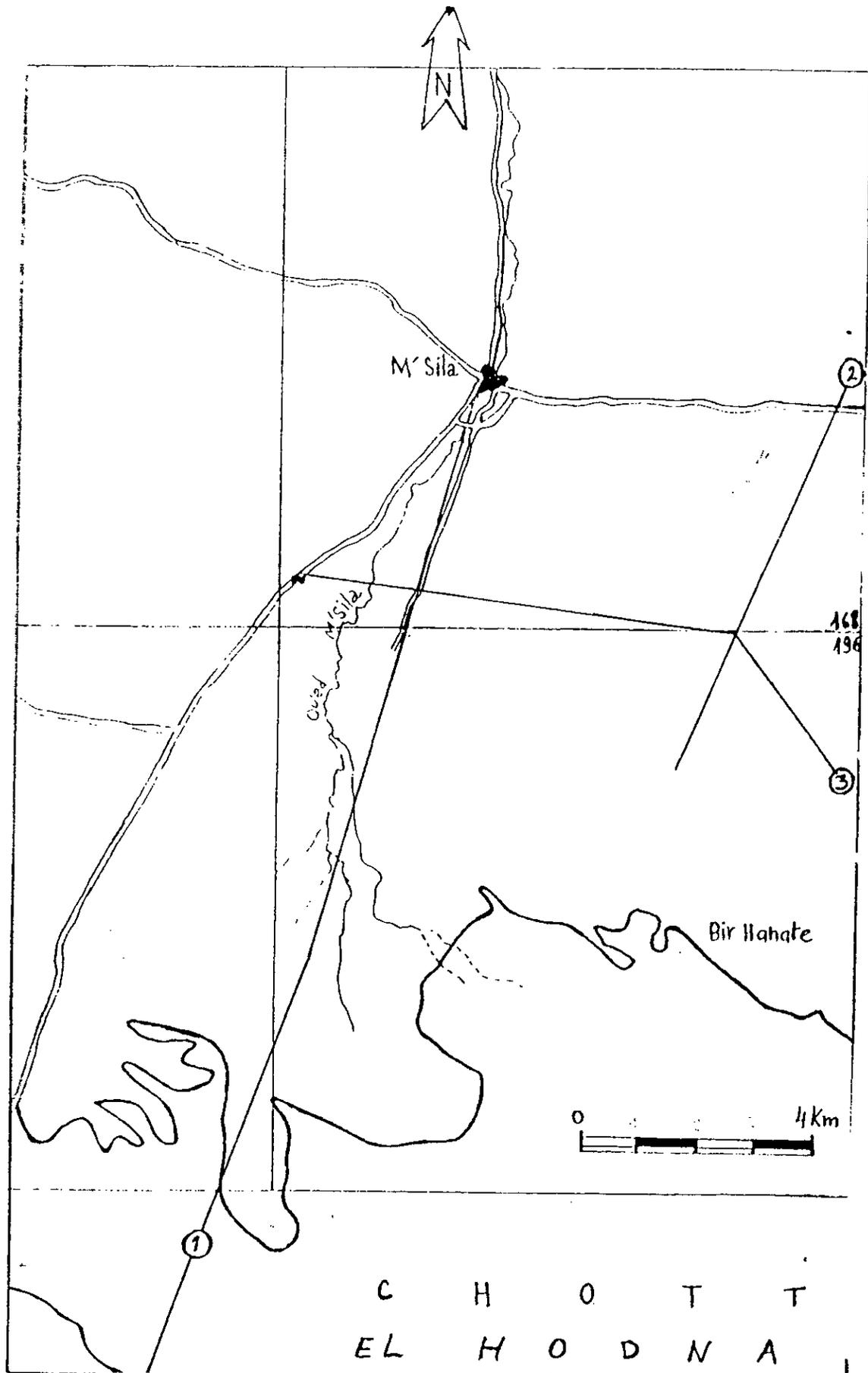


Figure 20 : Orientations des coupes Hydrogéologiques. D'après C.G.G, 1973

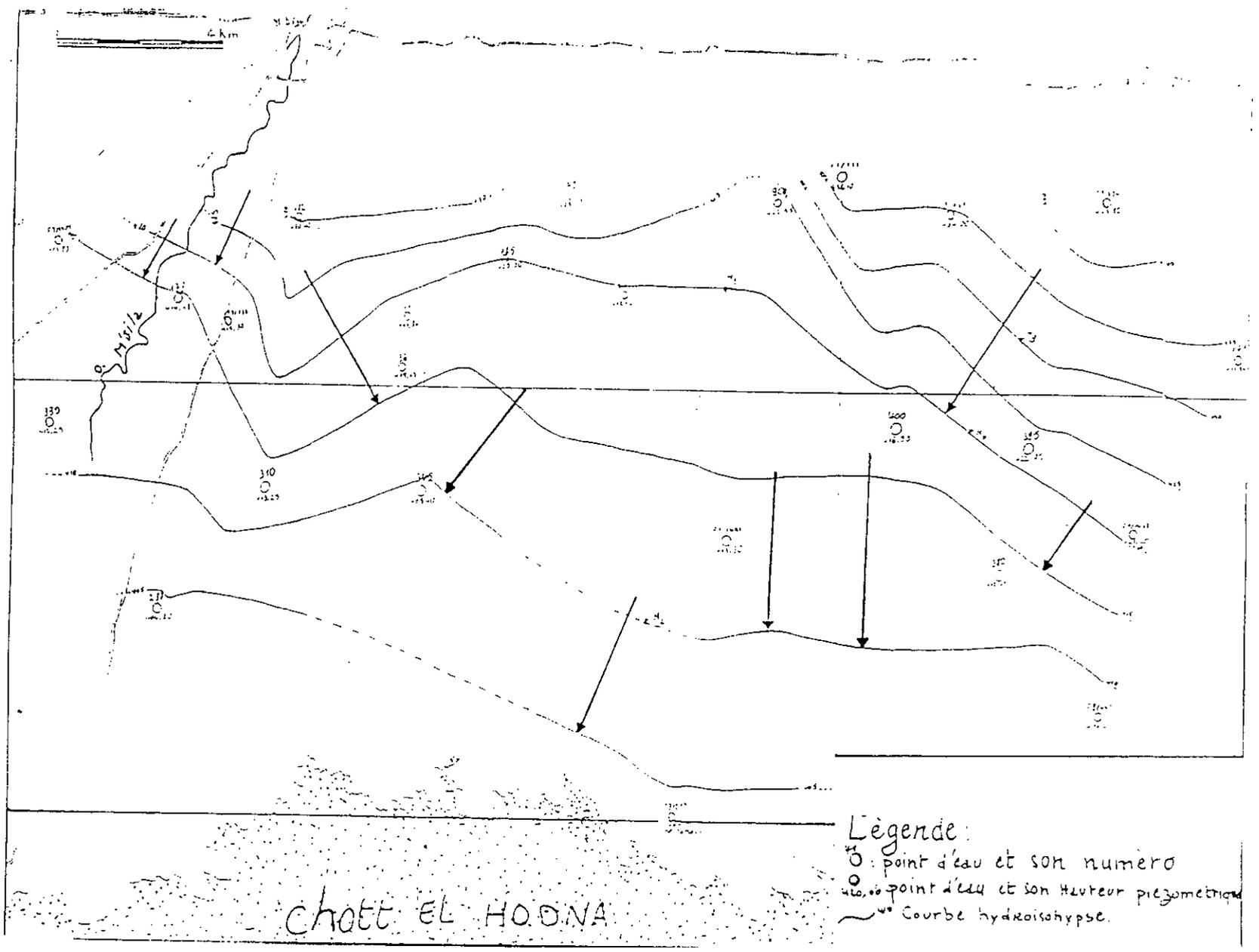


Figure 21 : Carte Piezometrique. D'après Lakroune, 1999

III.5 Hydrochimie :

L'étude hydrochimique des eaux souterraines est importante à effectuer, car elle nous permet d'évaluer cette eau à son utilisation aussi bien pour l'alimentation humaine en eau potable, que pour l'irrigation.

Dans notre étude, on a repris les conductivités électriques et les nitrates de 20 points d'eau (Annexe 3) réparties entre M'sila et le Chott.

Le choix de ces deux variables est justifié par l'importance que représente la conductivité électrique, en relation directe avec la quantité des éléments dissous dans l'eau, les eaux présentant de forte minéralisation constituent un facteur limitatif de la qualité des eaux destinées à l'alimentation en eau potable et à l'agriculture. Les nitrates eux d'origine agricole constituent un danger pour la santé quand les concentrations sont élevées (>à 44 mg/l).

III.5.1 Conductivité électrique (C.E) :

La salinité d'une eau, ou teneur en matière soluble peut s'exprimer facilement par la conductivité électrique (Durand, 1983), elle est évaluée entre 800 micromhos/cm à 25°C et 10300 micromhos/cm à 25°C.

III.5.2 Teneurs en nitrates (NO₃) :

Les teneurs en nitrates varient entre 1 mg/l et 115 mg/l, les teneurs élevées sont probablement d'origine agricole (apport d'engrais).

Remarque :

Les analyses physico-chimiques sur les eaux souterraines de M'sila sont effectuées par l'A.N.R.H.

Conclusion :

L'aquifère superficiel Plio- Quaternaire de M'SILA est caractérisé par une lithologie hétérogène, dans laquelle se localise une nappe libre qui peut être localement en charge à cause de la présence d'argiles imperméables, l'alimentation de cette nappe se fait par un écoulement globalement du Nord au Sud.

TROISIEME PARTIE

ANALYSE DES DONNEES ET INTERPRETATION

ANALYSE DES DONNEES ET INTERPRETATION

CHAPITRE I

ETUDE STATISTIQUE DES DONNEES

I.1 Introduction :

Préalablement à tout calcul géostatistique, il est nécessaire de procéder à une analyse statistique des données expérimentales. Cette analyse a pour but l'extraction d'information à partir des séries de données.

I.2 Acquisition et critique des données :

I.2.1 Acquisition :

Les analyses physico-chimiques sont effectuées par l'A.N.R.H sur les eaux souterraines de M'sila. Notons que le nombre de points de mesures nécessaire à la caractérisation d'une grandeur se déployant dans l'espace n'est pas définissable à priori de façon rigoureuse (Kammari, 1990).

Pour cette étude, nous disposons d'une vingtaine de points de mesure répartis de manière irrégulière sur toute la région de M'sila (fig. 22).

Les données relatives aux différents points d'eaux sont rassemblées dans le fichier de données.

I.2.2 Critique :

Une critique des données est nécessaire, avant de les utiliser dans leurs champs d'application.

Cette critique préliminaire consiste à corriger certaines erreurs, et fournir des explications dans l'étude ultérieure.

I.3 Evaluation des paramètres statistiques élémentaires :

L'examen des paramètres statistiques est indispensable pour la connaissance de la structure de l'échantillon.

On distingue trois catégories de paramètres :

- 1- paramètre de position,
- 2- paramètre de dispersion,
- 3- paramètre de forme.

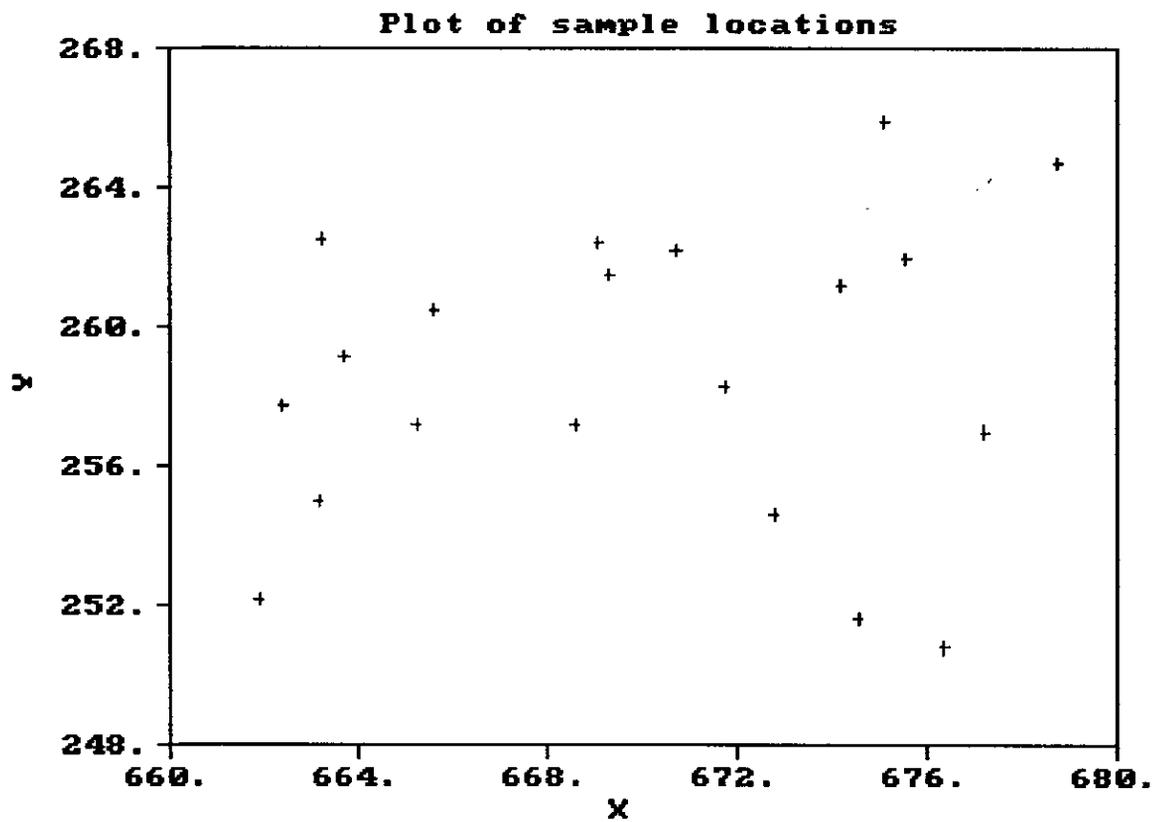


Figure 22 : Inventaire des points d'eaux

I.3.1 Paramètre de position :

- **La moyenne arithmétique :**

Elle est égale à la somme des valeurs correspondant aux divers éléments d'une série divisée par le nombre d'éléments de cette série.

C'est la mesure de la valeur centrale qui est plus utilisée en statistique :

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \quad (\text{I-1})$$

X_i : valeur de l'observation i .

n : taille de l'échantillon.

- **Le mode :**

C'est la valeur du caractère ayant la fréquence maximale.

- **La médiane :**

C'est la valeur pour laquelle il y a autant de valeurs inférieures que supérieures.

I.3.2 Paramètres de dispersion :

Ils permettent de chiffrer la variabilité des valeurs observées autour d'un paramètre de position, ce sont :

- **L'étendue :**

C'est la différence entre la plus grande et la plus petite réalisation de la distribution

$$W = X_{\max} - X_{\min} \quad (\text{I-2})$$

- **La variance :**

Par définition, la variance d'une population est donnée par :

$$\sigma^2 = \frac{1}{n} \sum (X_i - \bar{X})^2 \quad (\text{I-3})$$

- **L'écart type :**

Il est donné par :

$$\sigma = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \right]^{1/2} \quad (\text{I-4})$$

• **Le coefficient de variation :**

Le coefficient de variation permet de comparer la variabilité relative de plusieurs séries statistiques dont les ordres de grandeurs sont très différents :

$$C_v = \frac{\sigma}{|\bar{X}|} \quad (I-5)$$

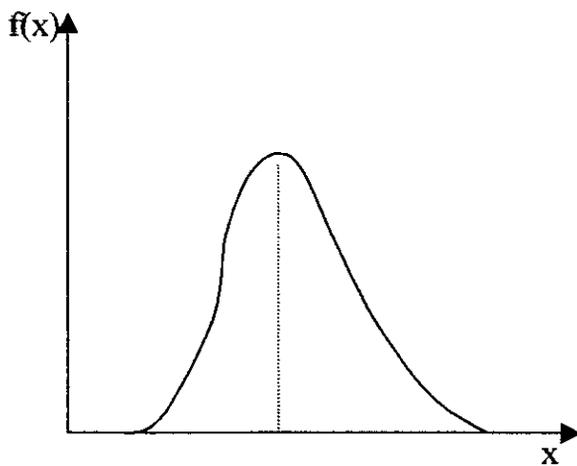
I.3.3 Paramètre de forme :

On distingue deux paramètres de forme :

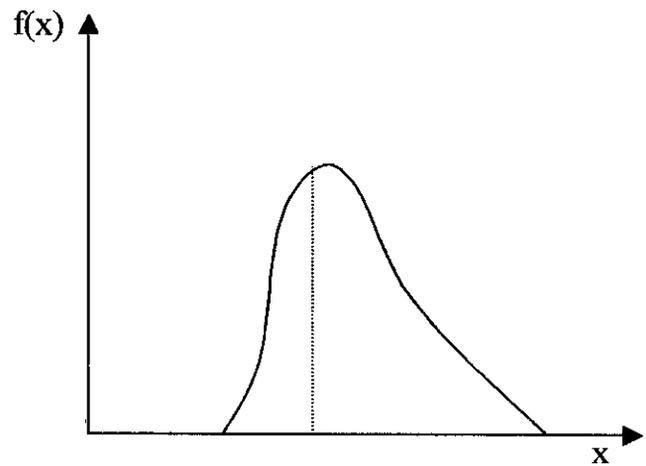
a- Coefficient d'asymétrie SKEWNESS :

Il est sans dimension, et sert à chiffrer l'intensité d'une symétrie :

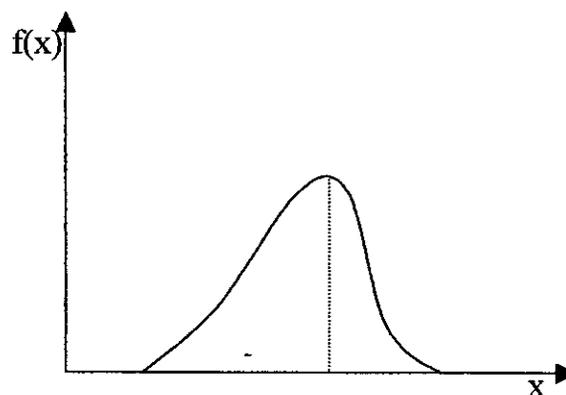
$$\text{SKEWNESS} = \frac{\frac{1}{n} \sum (X_i - \bar{X})^3}{\delta^3} \quad (I-5)$$



A₁ : asymétrie nulle
(Skewness = 0)



A₂ : asymétrie positive
(Skewness > 0)

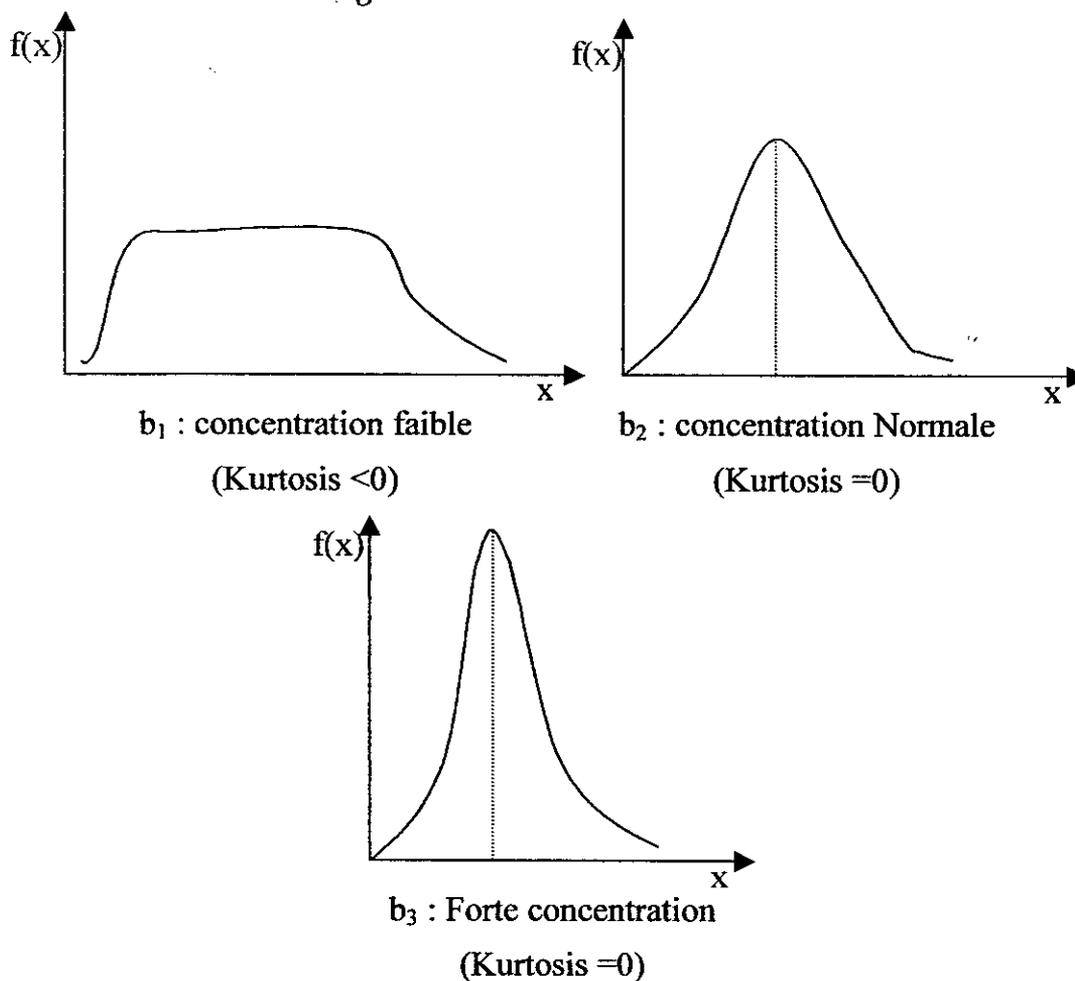


A₃ : asymétrie négative
(Skewness < 0)

b- Coefficient d'aplatissement (Kurtosis) :

Il est destiné à chiffrer l'aplatissement et concerne la concentration de la masse de fréquence autour du mode.

$$\text{Kurtosis} = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^4}{\sigma^4} - 3 \quad (\text{I-6})$$



Les différentes caractéristiques des paramètres statistiques des conductivités électriques et des nitrates (CE et NO_3) obtenues par le logiciel GEO- EAS sont résumés dans le tableau :

Tableau 1 : Paramètres statistiques élémentaires des données.

Paramètres	Variables	
	CE (en $\mu\text{mhos/cm}$)	NO ₃ (en mg/l)
Taille	20	20
Min	800	1
Max	10300	115
Etendu	9500	114
Moyenne	3215	28.35
Variance	5608711	667.71
Ecart type	2368.28	25.84
Coef de variatin (CV en %)	73.66	91.1
Médiane	2550	21
1 ^{er} quartile	1800	8
3 ^{ème} quartile	3400	34
Skewness	1.75	1.92
Kurtosis	5.61	7.36

• **Interprétation :**

Les paramètres statistiques qui décrivent le comportement des éléments chimiques sont donnés par le tableau 1.

La première constatation plausible sur ce tableau est la variabilité des données récoltées. Cette variabilité est bien marquée par une dispersion importante caractérisée par des étendues, des variances et par conséquent des écart- types (standard déviation) trop élevés.

Pour les valeurs du coefficient de variation des conductivités électriques et des nitrates sont très élevés. D'après Jekhowsky in (Abdou, 1997), la variabilité est irrégulière.

Les valeurs du 1^{er} quartile indiquent 25% des valeurs des échantillons sont inférieurs à 1800 $\mu\text{mhos/cm}$ pour C.E et 80 mg/l pour NO₃, tandis que celles du 3^{ème} quartile indiquent que 75% des valeurs de l'échantillon sont supérieurs à 3400 $\mu\text{mhos/cm}$ pour C.E et 34 mg/l pour NO₃.

On remarque que les coefficients d'asymétrie (Skewness) sont positifs, ce qui indiquent que les dispersions sont étirées vers la droite, les Skewness des C.E et NO₃ sont faibles se rapprochant de zéro, ce qui montre que la distribution est sensiblement symétrique.

Les coefficients d'aplatissement (Kurtosis) sont positifs et un peu élevés, ce qui traduit la forte concentration des données (Spiegel, 1982).

I.4 Ajustement aux lois de probabilités :

L'ajustement a pour but de vérifier qu'un échantillon provient ou non d'une variable aléatoire de distribution connue. Dans l'étude géostatistique, la connaissance de la loi de distribution des paramètres est indispensable, signalons toute fois que dans les lois normales et Log normales sont souvent traitées.

La représentation graphique des conductivités électriques et des nitrates en fonction de leurs fréquences relatives (fig.23) et fig.24 montre une dissymétrie, qui nous laisse penser à une loi Log normale.

Cela nous a incité à représenter les Log (C.E), et les Log (NO_3) fig 25 et fig 26 qui montrent une certaine symétrie indiquant une normalité de C.E et de NO_3 .

La représentation des variables (C.E, NO_3) en fonction de leurs fréquences cumulatives sous forme de diagramme permet de juger la normalité de la distribution.

La linéarité ou la quasi- linéarité du diagramme ainsi obtenue (c'est ce qu'on appelle droite d'HENRY) peut en effet être considérée comme indice de normalité.

La droite d'HENRY présentée en fig. 27 et fig. 28, rejette l'hypothèse de normalité des conductivités électriques et des nitrates.

Par contre, la fig. 29 et la fig.30 par sa linéarité favorise la normalité des Log C.E et Log NO_3 .

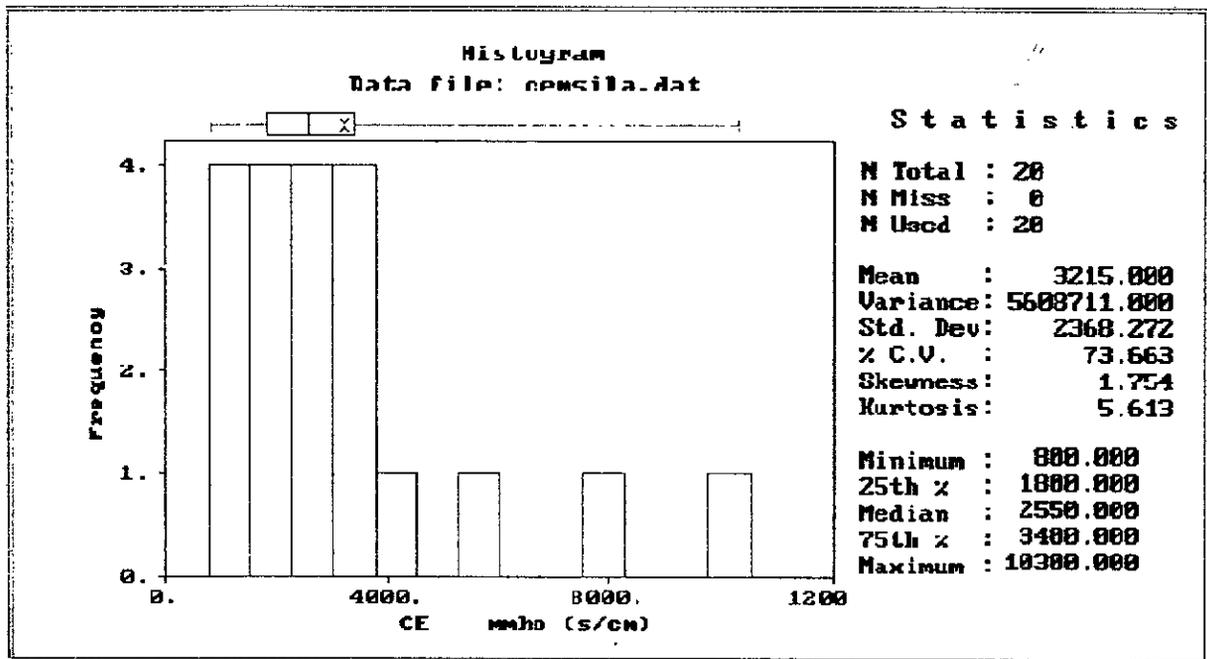


Figure 23 : Histogramme de Conductivité Electrique (CE) – Loi Normale

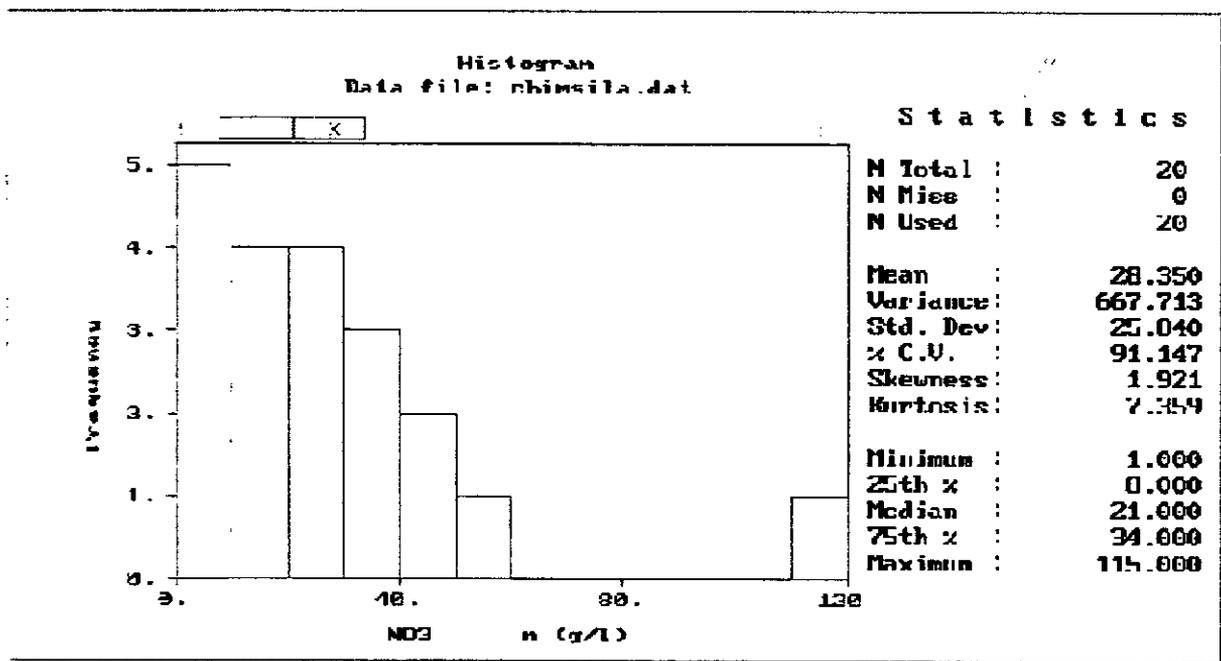


Figure 24 : Histogramme de Nitrates (NO3)- Loi Normale

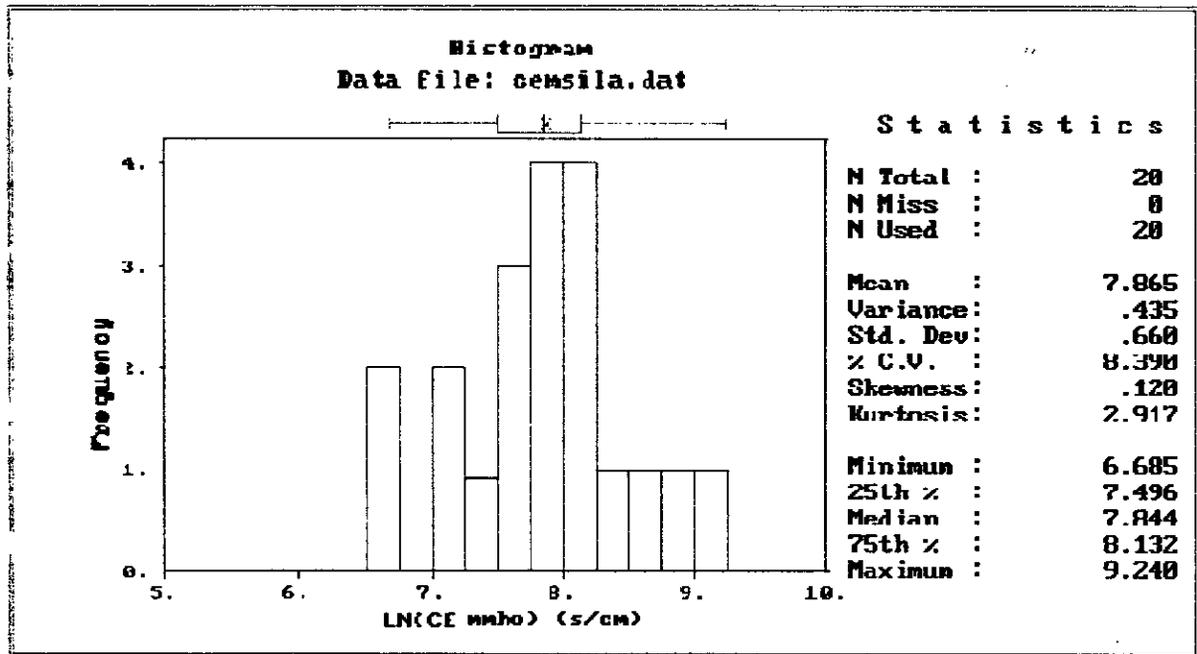


Figure 25 : Histogramme de la Conductivité Electrique (CE) – Loi Log Normale

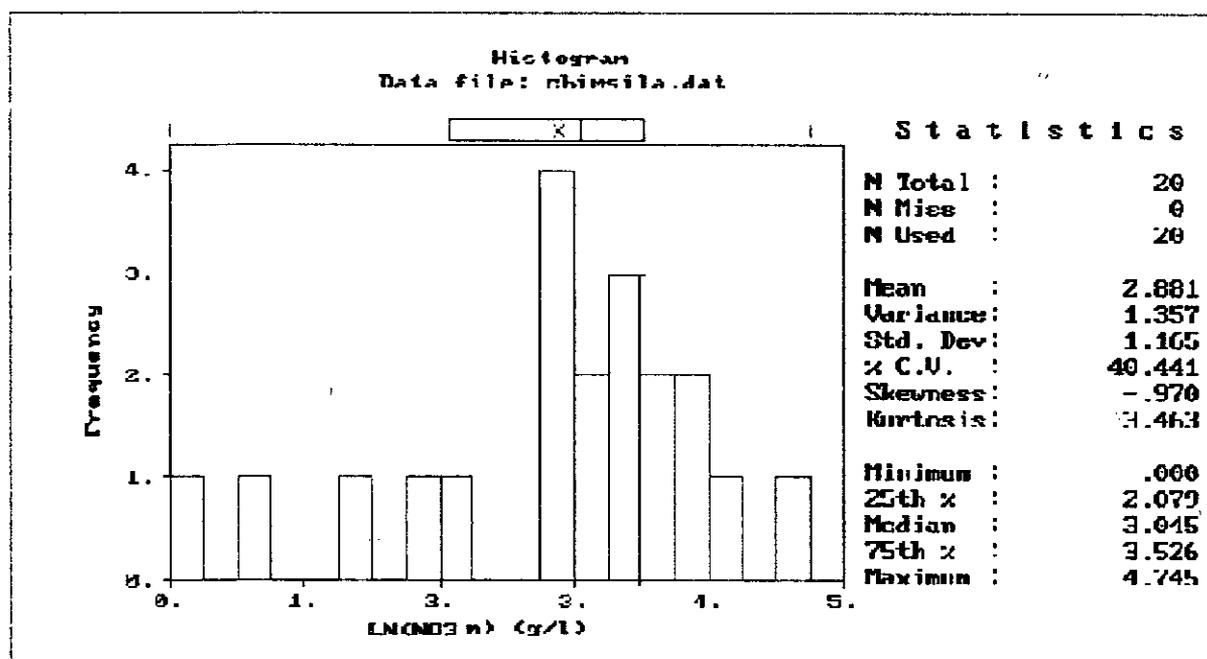


Figure 26 : Histogramme de Nitrates (NO3) – Loi Log Normale

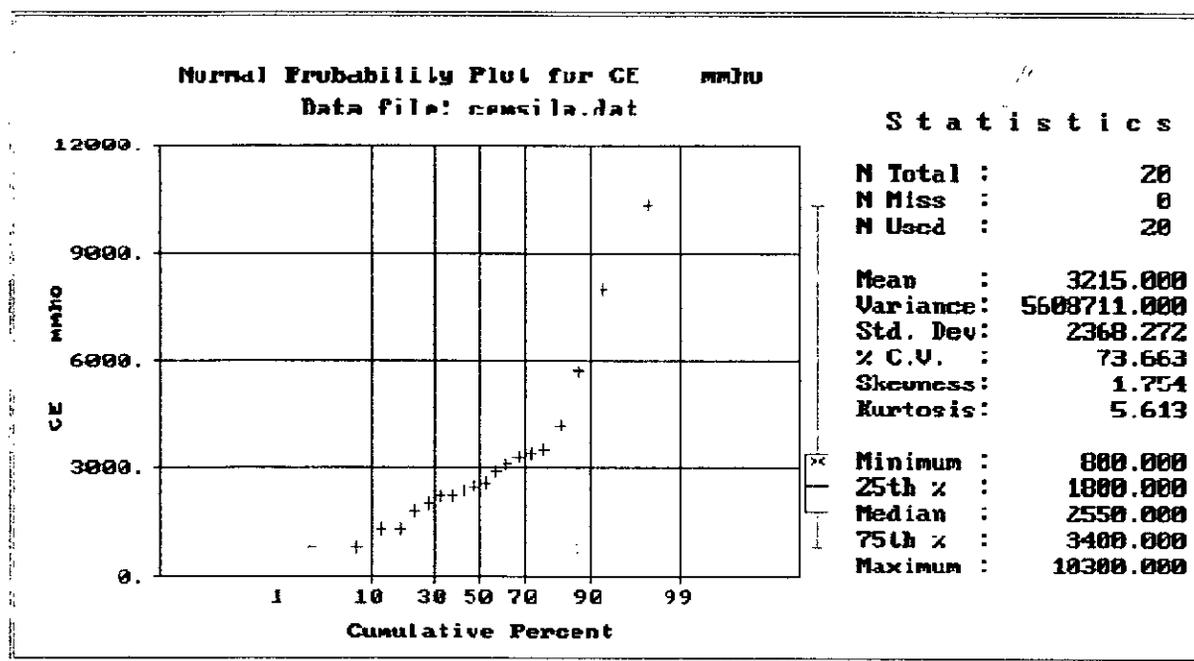


Figure 27 : Adéquation Mathématique de CE –Loi Normale

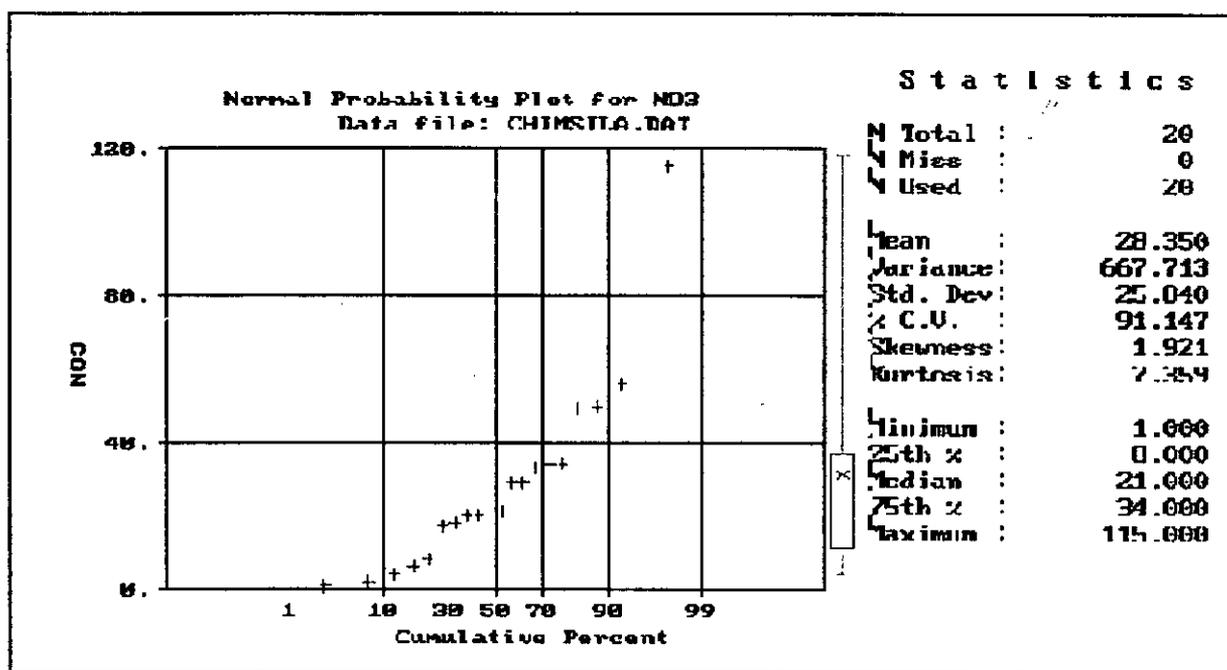


Figure 28 : Adéquation Mathématique de NO3 –Loi Normale

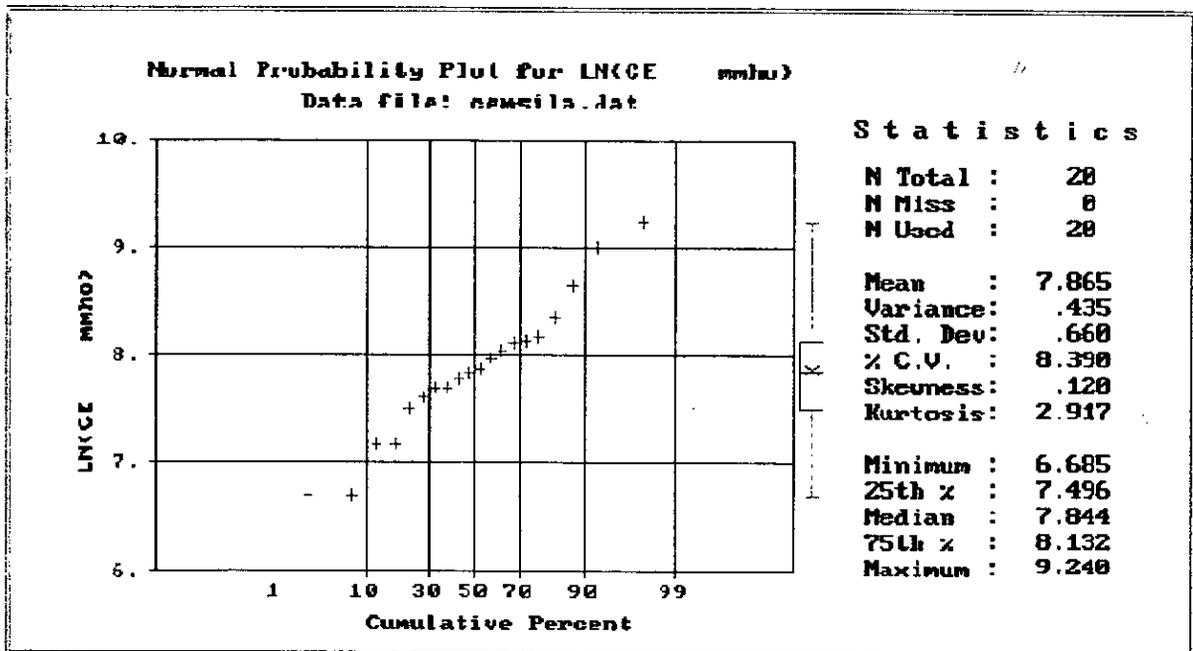


Figure 29 : Adéquation Mathématique de CE –Loi Log Normale

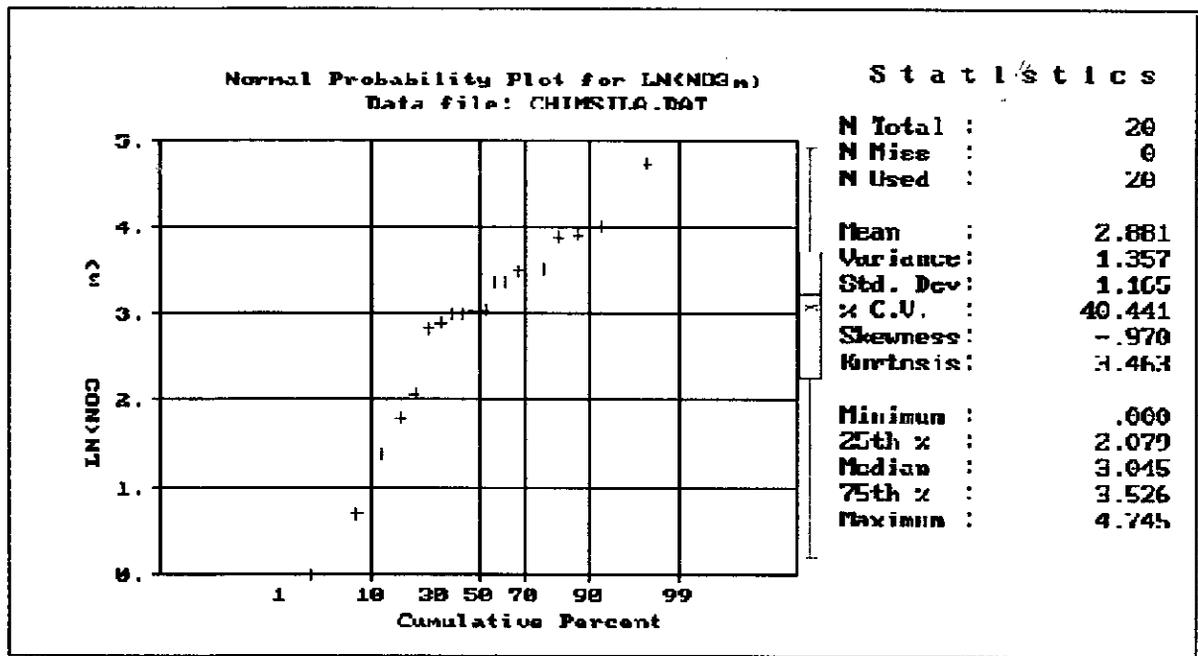


Figure 30 : Adéquation Mathématique de NO3 –Loi Log Normale

CHAPITRE II

ETUDE VARIOGRAPHIQUE ET KRIGEAGE DES DONNEES ET INTERPRETATION

II.1 Variographie :

L'étude de l'analyse structurale depuis la construction du variogramme jusqu'à sa modélisation et sa validation est assurée par le logiciel GEO- EAS. Il est décrit en détail dans certaines thèses (thèses de Magister : Azouzi, 1993 ; Douaoui, 1992) et le guide du logiciel E. EVAN, 1990. Nous donnerons en annexe 2, une description sommaire des modules qui le composent.

II.1.1 Construction du variogramme :

On utilise les coordonnées Lambert X(longitude en Km) et Y(latitude en Km), l'option **PREVAR** établie le fichier d'extension. PCF qui renferme le nombre de couples $N(N - 1)/2$, nécessaire pour construire le variogramme expérimental. Ce même fichier. PCF va être utilisé par l'option **VARIO** pour la construction proprement dite du variogramme, et sa modélisation.

Notons que la construction du variogramme a été faite en tenant compte des remarques faites en première partie (chapitre II).

a- Variogramme de C.E :

Le variogramme expérimental a été calculé sur la base des données brutes des conductivités électriques C.E.

Nous avons calculé $\gamma(h)$ sur une distance de 30 km alors que la distance maximale qui sépare les points utilisés pour cette variable est 15 km, en choisissant un pas « h » de 3 km. Pour chaque classe de distance, on peut lire :

- le nombre de couples ayant servi à l'estimation de $\gamma(h)$,
- la distance moyenne,
- la valeur de $\gamma(h)$.

b- Variogramme de NO_3^- :

Le mode de construction du variogramme est le même, la distance maximale est de 15 km, on a choisi un pas de 4 km.

II.1.2 Modélisation du Variogramme :

Après la construction du variogramme expérimental, la seconde étape consiste à l'ajuster à un modèle théorique donné.

Le modèle retenu qui nous apparaît le mieux adapté au variogramme pour la conductivité électrique est le modèle **Exponentiel** avec un effet de pépite égal à zéro ($\mu\text{mhos/cm}$)², un palier de 0.4 ($\mu\text{mhos/cm}$)² et une portée de 3.5 km (Fig. 31).

Pour les nitrates (NO_3^-), le modèle retenu est le modèle **Linéaire**, avec un effet de pépite égale à zéro (mg/l), une portée de 13 km et un palier de 2 (mg/l)². Fig. 32.

Les résultats sont résumés dans le tableau ci- dessous :

Tableau 2 : caractéristiques des variogrammes.

Variable	Type	Pépite	Portée	Palier
C.E	Exponentiel	0.000 ($\mu\text{mhos/cm}$) ²	3.5 km	0.4 ($\mu\text{mhos/cm}$) ²
NO_3^-	Linéaire	0.000 (mg/l) ²	13 km	2 (mg/l) ²

II.1.3 Validation du Variogramme :

Après plusieurs tentatives, en jouant sur les paramètres du modèle pépite, variance et portée, un certain nombre d'ajustements sera visuellement accepté, et la décision d'accepter ou de rejeter définitivement un modèle ne peut se faire qu'après validation par l'option : **XVALID**.

L'acceptation ou le rejet de l'ajustement est dictée par le test de deux indices à savoir :

- La moyenne des écarts entre les valeurs estimées et celles mesurées qui doit tendre vers zéro pour vérifier qu'il n'y a pas de biais systématique.
- La moyenne quadratique des écarts réduits doit être tendre vers l'unité pour vérifier que les erreurs de Krigeage sont cohérentes avec la variance calculée .

Remarquons toute fois, que les valeurs obtenues au cours de notre étude, se rapprochent des normes préconisées pour le Krigeage.

Les résultats de **L'XVALID** sont regroupés dans le tableau 3.

Tableau 3 : Résultats de l'XVALID

Variable	Moyenne des écarts (m)	Moyenne quadratique des écarts (g)
C.E(en $\mu\text{mhos/cm}$)	0.017	0.999
NO_3^- (en mg/l)	0.031	1.120

En plus de la validation, le programme **XVALID** donne aussi une carte d'erreurs fig. 33 et fig. 34 respectivement pour les conductivités électriques (C.E) et les nitrates(NO_3).

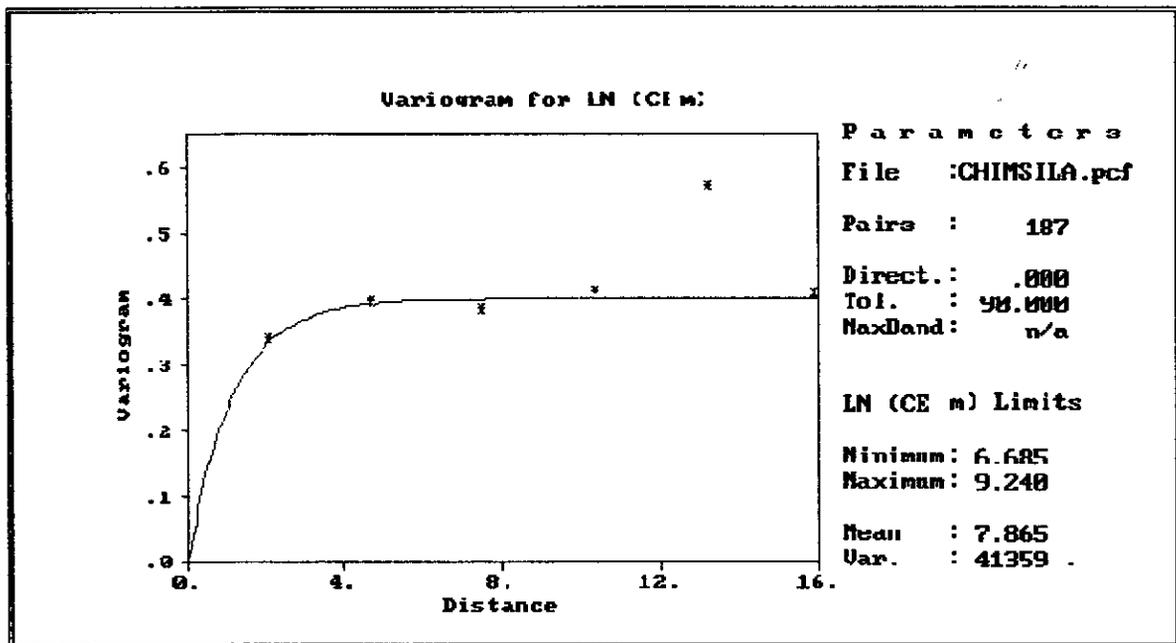


Figure 31 : Variogramme de Log CE

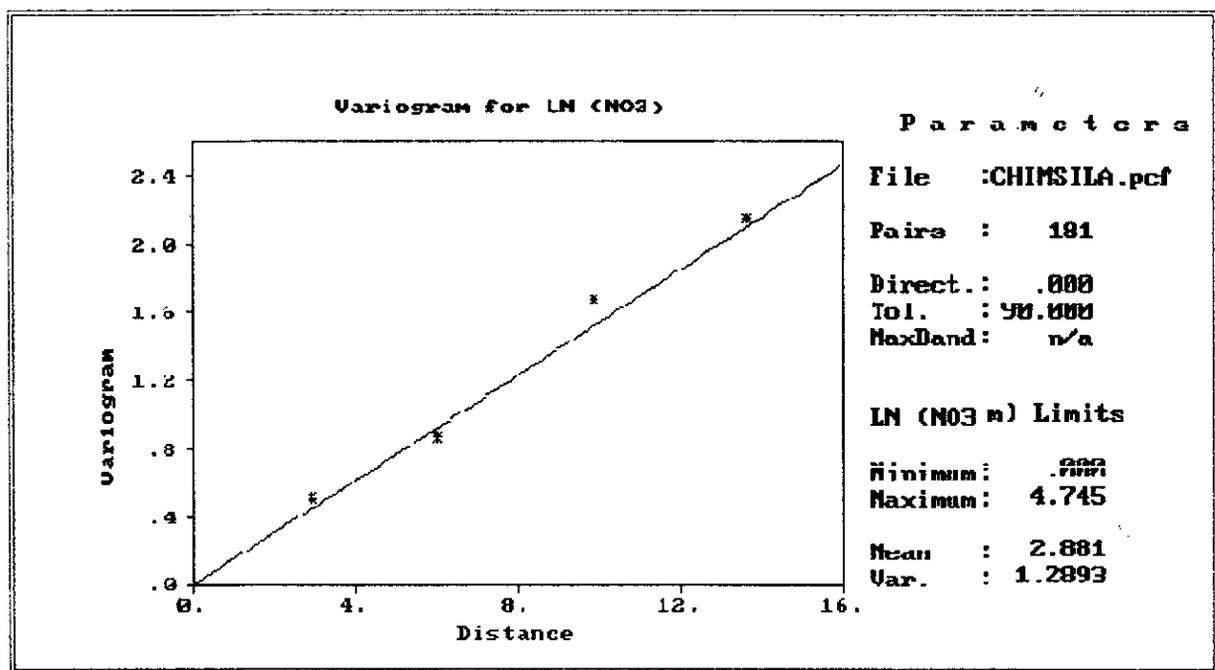


Figure 32 :Variogramme Log NO3

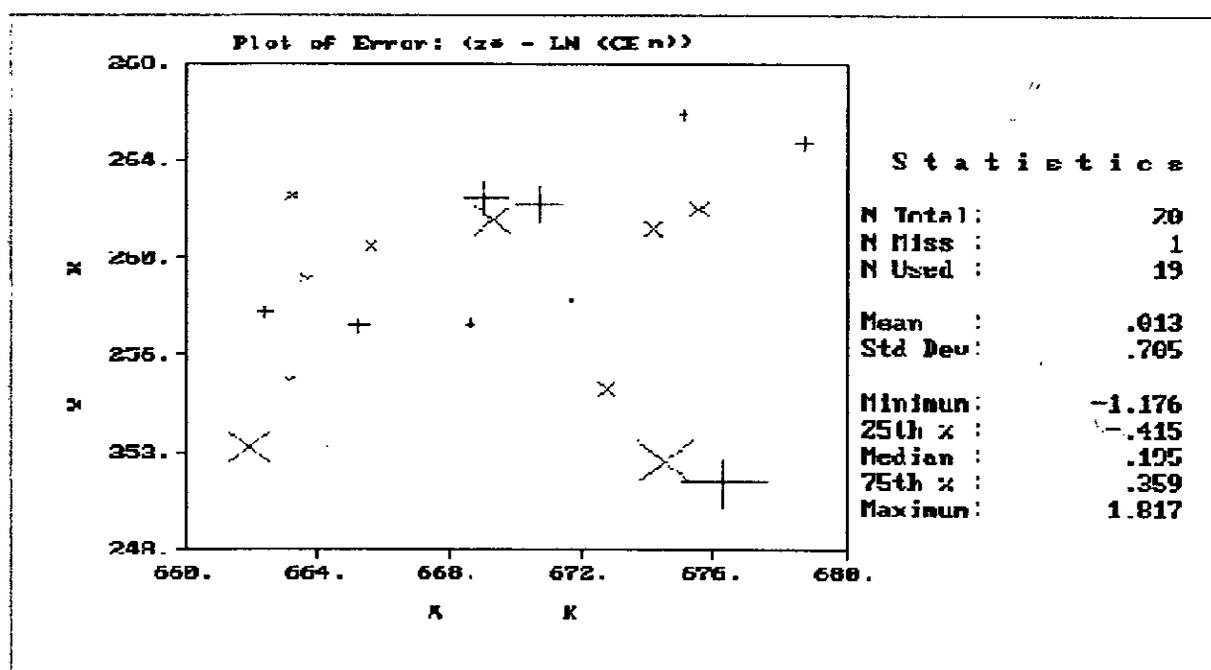


Figure 33 : Carte d'erreurs de la Conductivité Electrique

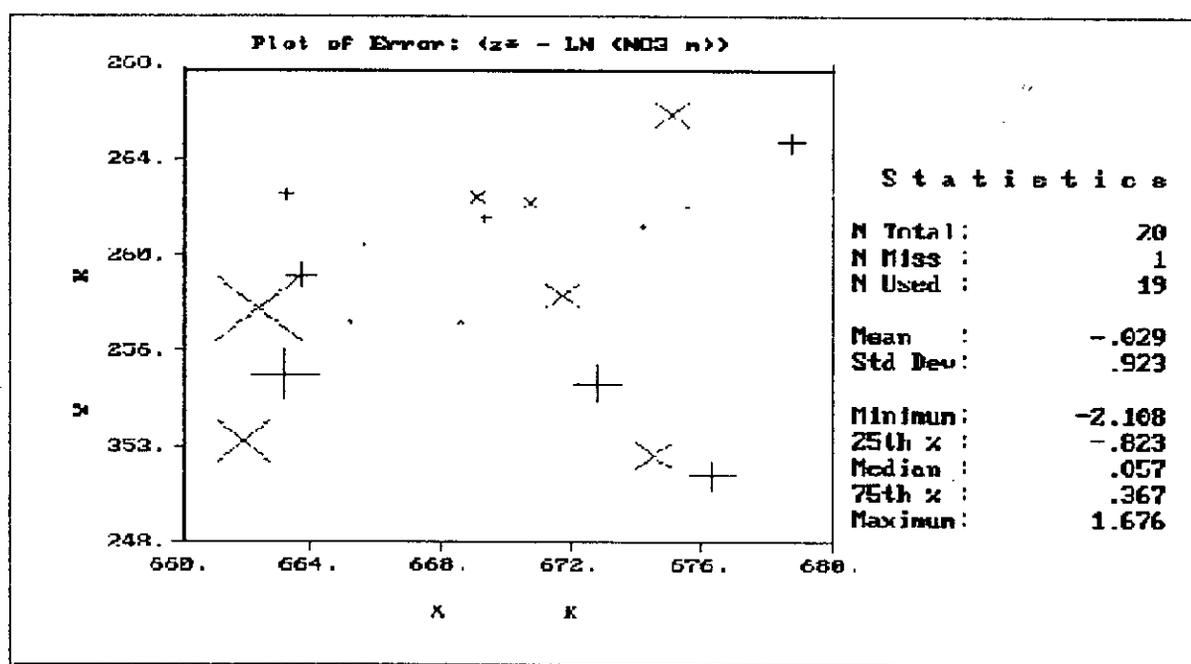


Figure 34 : Carte d'erreurs des Nitrates

Ces cartes sont la synthèse la plus importante dans l'étude géostatistique, car elles nous renseignent sur l'échantillonnage ainsi que la qualité des mesures effectuées. Sur ces cartes, on peut distinguer les valeurs surestimées représentées par le symbole (+) et les valeurs sous-estimées représentées par le symbole (X).

Notons que la taille de l'erreur est proportionnelle à la taille du symbole, plus le symbole (X) est grand plus les valeurs sont sous-estimées, et c'est valable pour le symbole (+).

II.1.4 Interprétation des cartes d'erreurs :

Sur la fig.33 et fig.34, on peut remarquer que les valeurs sous-estimées ainsi que les valeurs surestimées se localisent de manière plus ou moins régulière sur toute la plaine de M'sila. Cela peut traduire le manque d'échantillonnage ainsi que sa mauvaise distribution sur l'ensemble de la plaine car on remarque là où le nombre de données est élevé l'erreur est moins importante, ce qui est normale car la géostatistique ne crée pas d'information, elle ne fait traiter qu'au mieux cette information.

Pour ce qui est de la représentation graphique des erreurs sous forme d'histogramme de fréquence fig.35 et fig.36, nous voyons bien que le graphe soit sensiblement normal. Ce qui montre que ces erreurs tendent vers 0 pour la quasi-majorité des points de mesure, cela témoigne bien de la qualité de l'estimation.

II.2 Cartographie et interprétation :

Une carte est un support très facile d'utilisation, elle permet de résoudre des problèmes ponctuels telle que la connaissance de la teneur d'un paramètre chimique en un site donné, et d'avoir un aperçu global de l'ampleur du phénomène.

Les cartes krigées fig.37 et fig.38 ont été établies en utilisant le logiciel Windsurf.

II.2.1. Interprétation de carte des nitrates :

Origine des nitrates :

Il est connu que la pollution par les nitrates peut être causée principalement par **l'agriculture** considérée comme grande consommatrice d'azote qui est l'un des éléments majeurs pour la croissance des cultures.

Elle peut également provenir des **rejets de l'industrie** notamment l'agro-alimentaire, le bois et la papeterie, des **rejets des eaux usées** et des dépôts des ordures ménagères.

Nous pensons dans notre cas, que la forte concentration des nitrates à l'extrémité Nord de la zone d'étude est due à l'action de l'agriculture (fig.37).

Pour la partie Ouest de la zone (Oued M'sila), l'industrie participe à la propagation des nitrates dans les aquifères, car la plus part des usines ne possèdent pas leurs propres stations d'épuration, ou si elles existent, ne sont pas fonctionnelles.

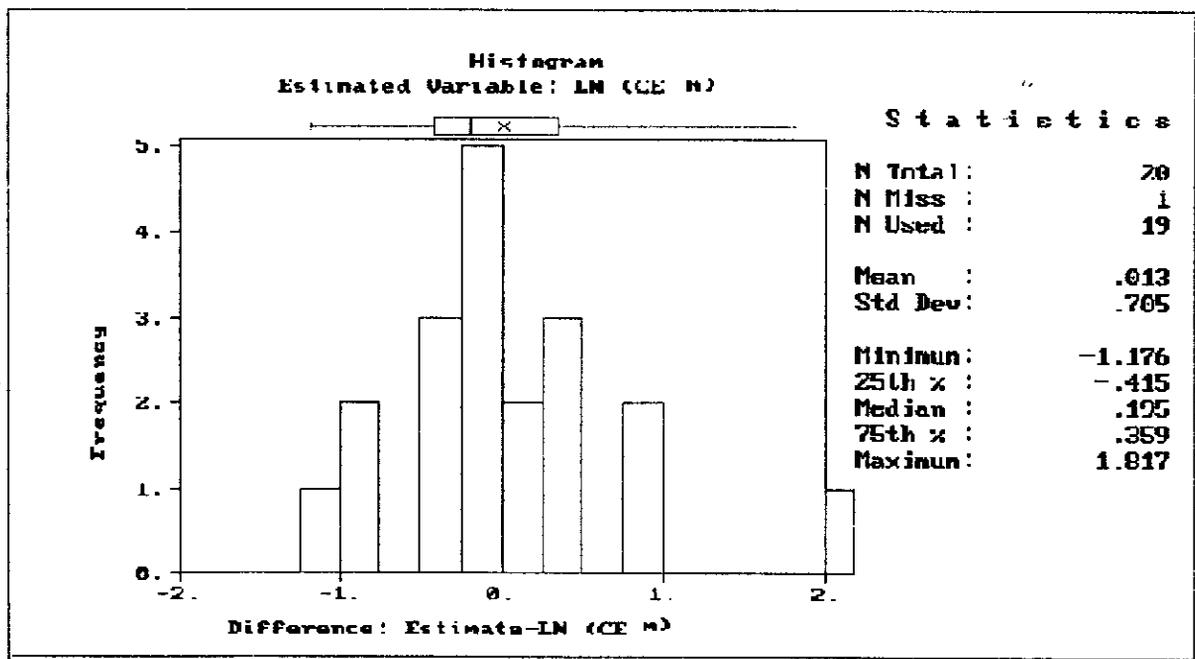


Figure 35 : Représentation graphique d'erreurs de Log CE

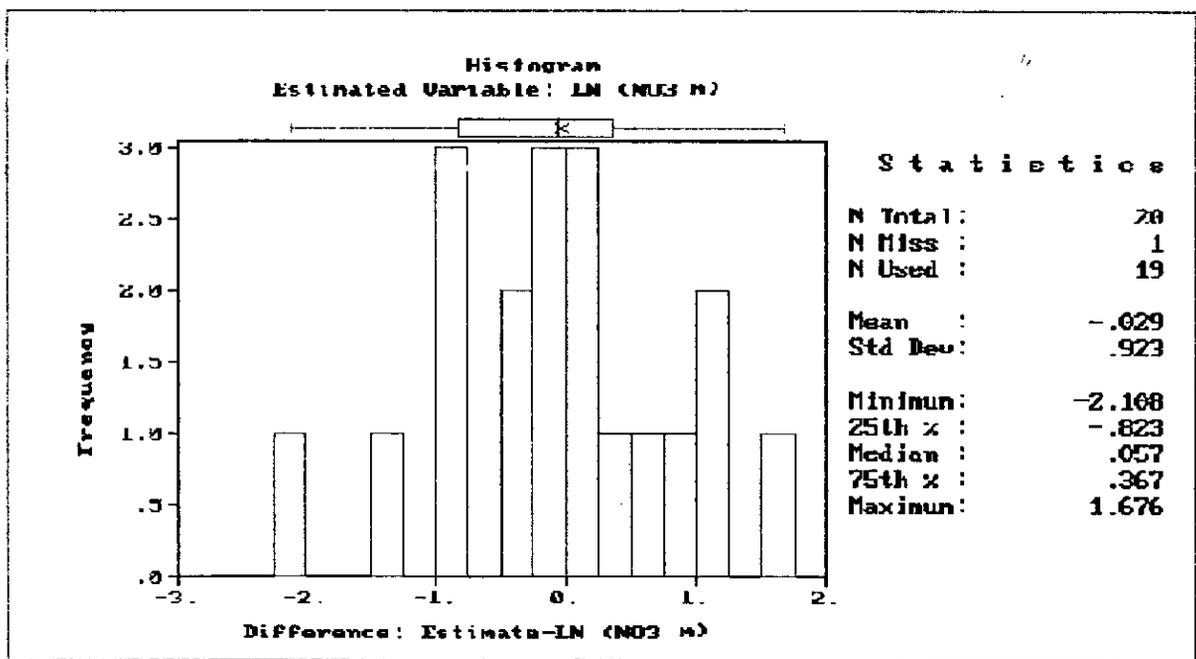


Figure 36 : Représentation graphique des erreurs de Log NO3

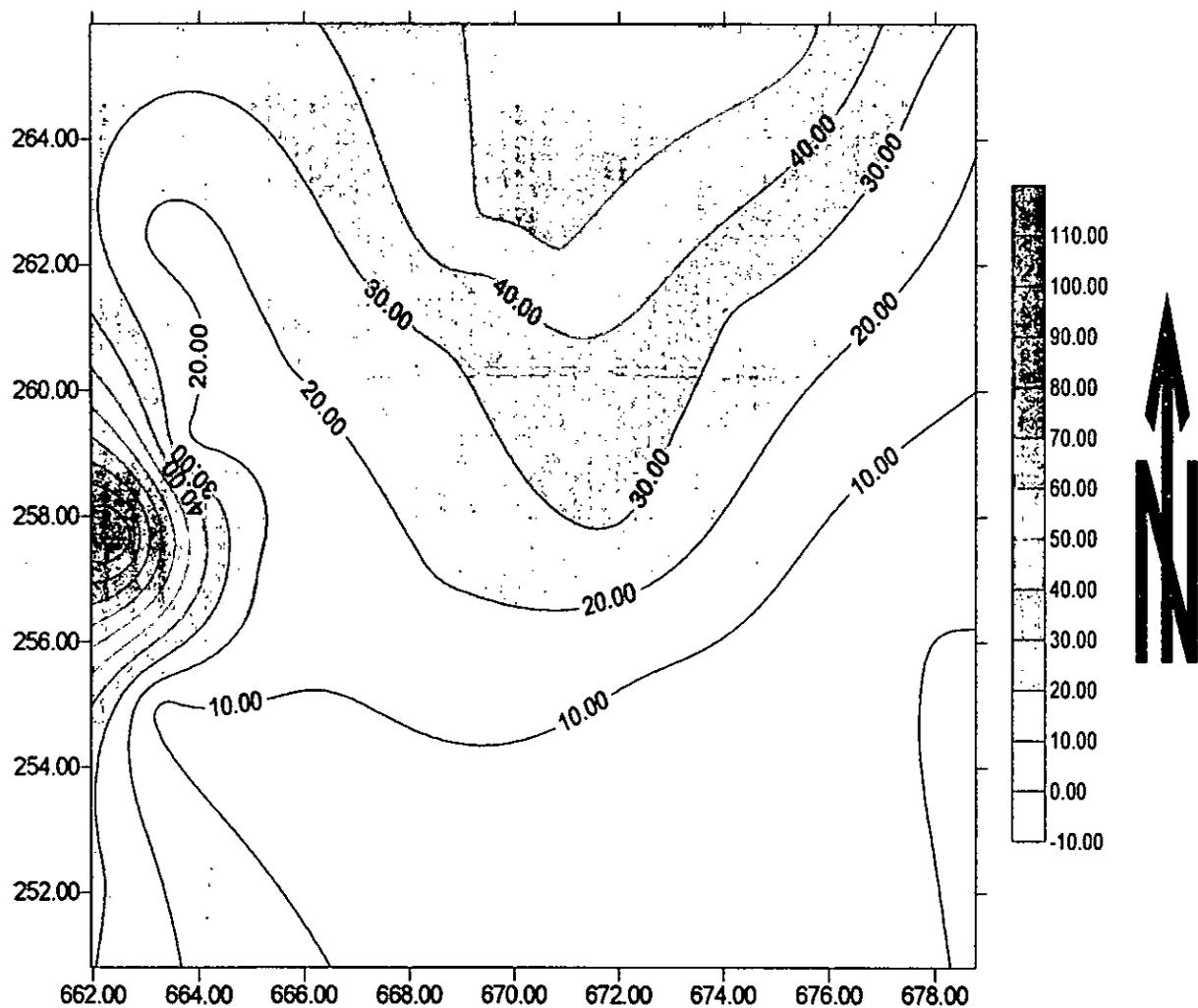


Figure 37 : Carte Krigées des Nitrates

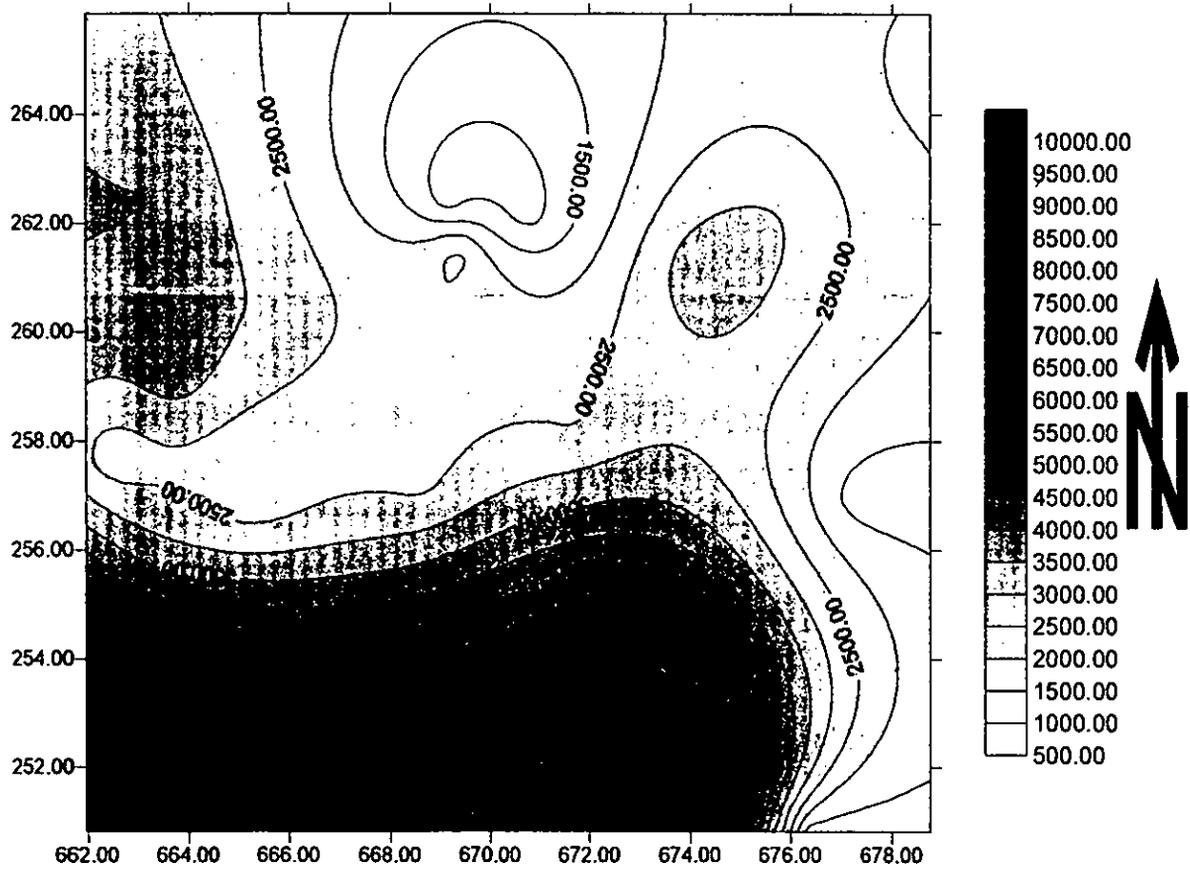


Figure 38 : Carte Krigées de la Conductivité Electrique

La comparaison des teneurs des nitrates avec les normes de l'Organisation Mondiale de la Santé (limite acceptable: 44 mg/l , limite maximale admissible : 100mg/l) montre qu'on peut parler de pollution au niveau de certaines zones.

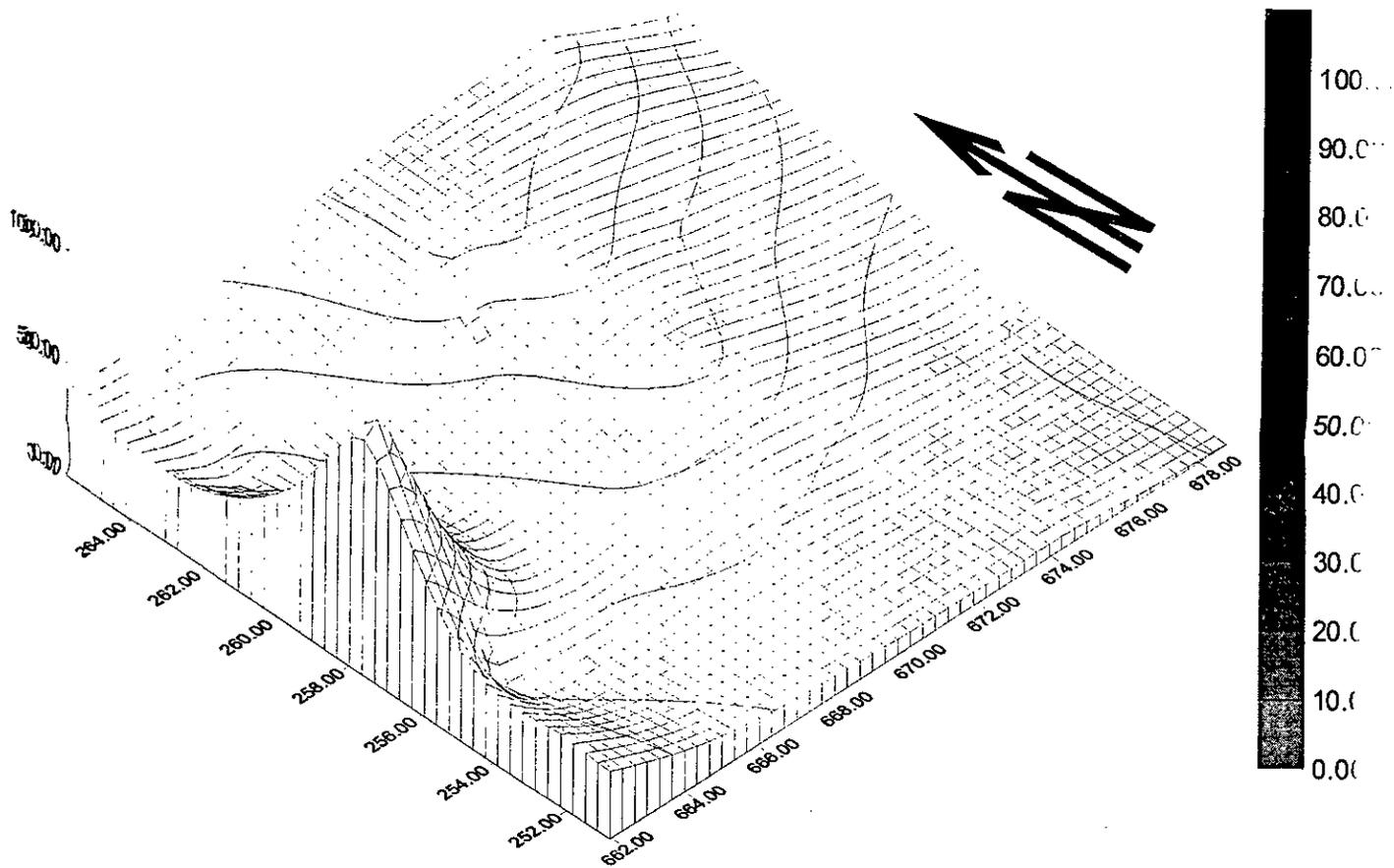
II.2.2 Interprétation de carte de la conductivité électrique :

La conductivité électrique est un facteur limitant pour limitant pour l'agriculture (problème de salinisation des sols). Selon Rodier, 1978, une conductivité électrique supérieure à 1550micromhos/cm fait considérer une eau comme inutilisable dans les zones irriguées.

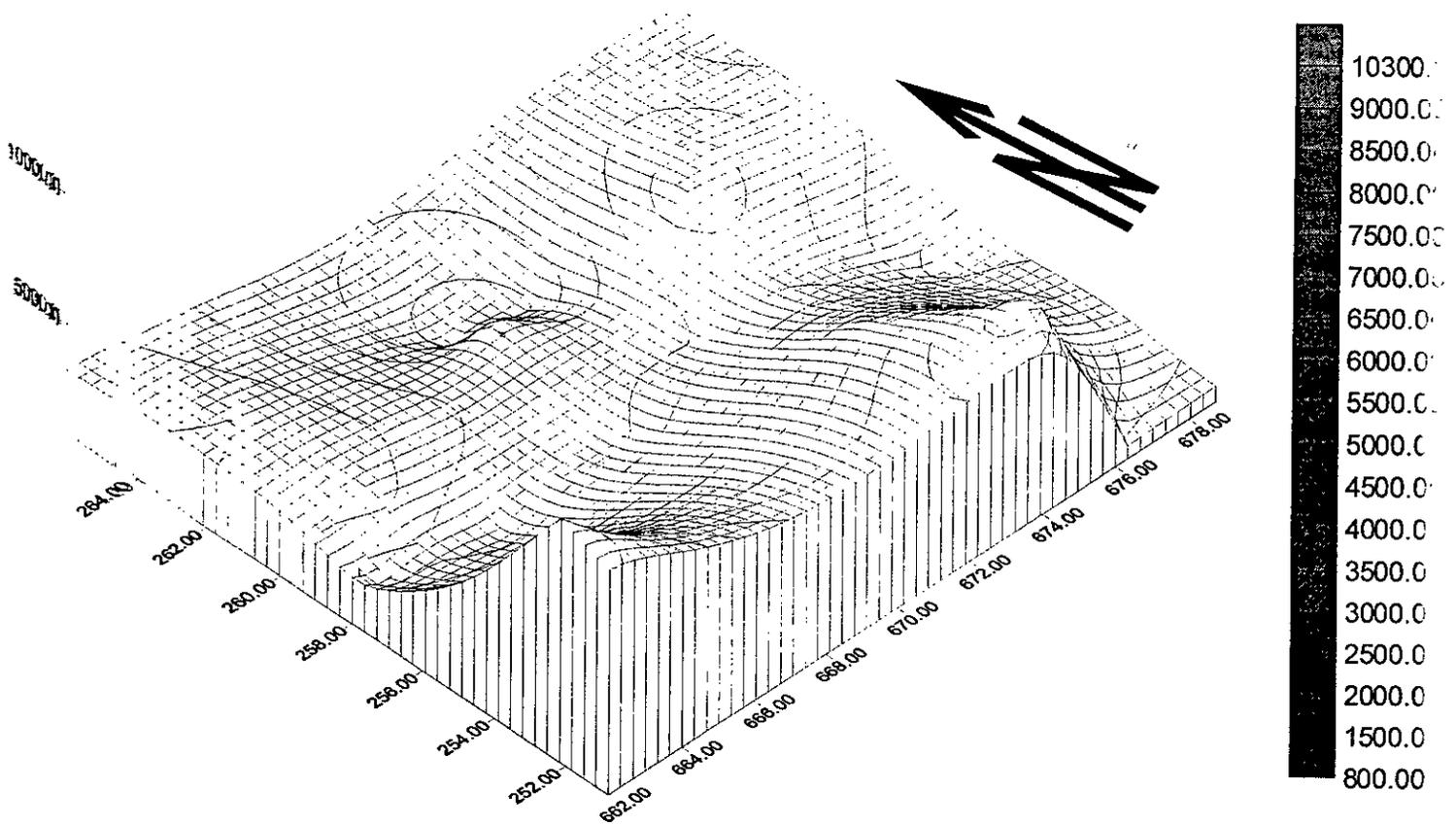
Les sels solubles contenus dans les eaux d'irrigation d'origine souterraine, sont susceptibles de contaminer les sols par des accumulations de produits solubles dans le milieu poreux du sol. Il en résulte une transformation profonde des propriétés physiques et chimiques du sol.

Pour une conductivité électrique ($C.E > 2550$ micromhos/cm à 25°C), il y a un risque de salinisation très élevé, ces eaux sont de qualité mauvaise, elles ne sont pas utilisées que dans les sols légers et bien drainés, mais seulement pour les plantes résistantes.

Nous voyons bien sur la figure.38 que la conductivité électrique a tendance à évoluer dans le sens de l'écoulement des eaux souterraines (du Nord vers le Chott).



CARTE DES NITRATE (en trois dimension)



CARTE DE LA CONDUCTIVITE ELECTRIQUE(en trois dimension)

CONCLUSION GENERALE

Conclusion

Dans ce travail, nous avons utilisé la géostatistique comme outil de traitement des données pour décrire le comportement de la conductivité électrique et des nitrates et leurs évaluation dans l'espace à travers des cartes établie par krigeage.

Le réseau d'échantillonnage est loin d'être suffisant pour décrire réellement l'évolution spatiale de C.E et NO₃ par rapport à la surface totale de la région.

L'analyse statistique a montré une distribution dissymétrique des valeurs, ce qui nous a incité à traiter les logarithmes des valeurs dans la géostatistique.

D'après notre modeste étude, on peut dire que le comportement des variables étudiées n'est pas purement aléatoire, mais obéit à certaines lois structurales caractérisant leurs variabilités spatiales déterminées par le biais du variogramme qui reste l'outil de base de l'approche géostatistique.

Les cartes obtenues parés krigeage ont permis de tracer l'évolution spatiale des éléments chimiques dans leurs zones de localisation. Pour la conductivité électrique on a constaté qu'elle augmente avec le sens d'écoulement des eaux souterraines, nitrates par contre ne montrent pas de sens d'évolution particulier. Du point de vue qualité pour l'alimentation en eau potable les eaux souterraines de M'sila sont d'autant moins potables que l'on va du Nord au Sud.

La comparaison des teneurs des nitrates aux normes internationales (O.M.S), nous permettent de parler de pollution chimique des eaux souterraines de certaines zones de la région de M'sila.

Enfin notre travail vise surtout à encourager l'introduction de ces nouvelles technique basées sur l'outil informatique dans le domaine de l'hydraulique.

.....

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BIBLIOGRAPHIE

- 1) **AZOUZI . B . (1993)** : Contribution à la cartographie automatique des grandeurs hydrogéologiques (application à la Mitidja).
Thèse de Magister ,ed, INA .
- 2) **CASTANY .G .(1982)** :Principes et méthodes de l'hydrogéologie .
Ed .Dunond , Paris .236p .
- 3) **C.G.G.(1973)** : Coupes hydrogéologiques du Hodna.
Rapport F.A.O .
- 4) **DAHMANI .A .(1992)** : Variabilité spatiale des paramètres hydrodynamiques .
Thèse d'ingénieur . INA .
- 5) **DEKKICHE .B .(1974)** : Contribution à l'étude des sols du Hodna et corrélation géochimique des eaux de la nappe .
Thèse de doctorat , université de GANT .
- 6) **DELHOMME .JP , DE MARSILY G , BEUCHER . H.D , (1981)** : Analyse stochastique des propriétés des systèmes poreux naturels hétérogènes .
Compte rendu de fin d'étude d'une recherche scientifique et technique financée par l'INRA de Paris .
- 7) **DOUAOULA , (1993)** : Contribution à l'étude des sols des plaines du Cheliff (variabilité spatiale) , Thèse de Magister , INA.
- 8) **DURAND . J . H , (1983)** : Les sols irrigables : étude pédologiques .
Ed . Presse universitaire , Paris , 322p .
- 9) **ECOLE DE MINES DE PARIS** ,centre de géostatistique .
URL : cg .ensmp . Fr/
- 10) **EVAN E. (1990)** : GEO-EAS (Géostatistical Environmental Assessment software),
User's guide U.S , environmental protection Agency,
Las Vegas , Nevada.
- 11) **GASCUEL .ODOUX.C. (1984)** : Application de la géostatistique à l'étude de la variabilité spatiales des propriétés hydrique de sol
Thèse docteur ingénieur ,Paris .
- 12) **GUIRAND. R. (1990)** : Evolution poste-triasique de l'avant pays de la chaîne alpine en Algérie d'après l'étude du bassin du Hodna et des régions voisines .
Office National da la Géologie . Alger , 259p

- 13) **JOURNEL . A. G. (1977)** : Géostatistique minière , centre de géostatistique .Ecole des mines , Fontainebleu , 377p.
- 14) **KETTAB A. (1992)** : Traitement des eaux .
Ed. OPU , Alger.
- 15) **KHAMMARI G. (1990)** :Variographie des ions nitrates et des résidus secs dans la plaine de la Mitidja . Article portant sur la pollution.
- 16) **MATHERON G.(1965)** :Les valeurs régionalisées et leurs estimation . Masson , Paris ,305p.
- 17) **REMINIERAS.G. (1972)** :Hydrologie de l'ingénieur . 3^{ème} édition .
- 18) **RODIER.J. (1978)** : L'analyse de l'eau : Eaux naturelles , eaux résiduelles , eaux de mer.
- 19) **ROSSI.J.P , LAVELLE.P , TONDOH.J.E , (1995)** :Statistical tool for soil biology Géostatistics ,analysis , Eur , J.
- 20) **SAPORTA .G . (1978)** :Théories et méthodes de la statistique , Paris .
- 21) **STEVEN.F.C ,GRAHAME F , (1996)** : Transition probability-Based Indicator . Géostatistics . Mathématique géologie , vol 28.
- 22) **VALIRON.F. (1992)** : Gestion des eaux ,tom3 : automatisation , informatique et télégestion , ENPC , Paris.
- 23) **VOLTZ.M , (1986)** : Variabilité spatiale des propriétés physiques en milieu alluvial. Essai de cartographie quantitative des paramètres Hydrodynamiques.
Thèse de docteur ingénieur , ENS M ,198p.
- 24) **ZIANI . (1995)** : Contribution de l'étude géostatistique du gisement aurifère
Thèse d'ingénieur ,ENP.

ANNEX 1

Le krigeage simple permet l'estimation de la valeur Z_0 au point 0 par une combinaison linéaire des valeurs observées de la variables Z au points voisins ($i=1, \dots, n$) par l'expression

$$Z_0^* = \sum_i^k \lambda_i \cdot Z_i,$$

il doit satisfaire à la condition de non biais, c'est à dire que la moyenne des erreurs d'estimation doit être nul et à la condition d'optimalité. (la variance d'estimation doit être minimal). c'est deux condition de non biais;

$$E[(Z_0^* - Z_0)] = 0 \quad (1)$$

$$\text{condition d'optimalité; } \text{Var} (Z_0^* - Z_0) = \text{mini} \quad (2)$$

En développant l'équation (2) on aura

$$E[(Z_0^* - Z_0)^2] = E[(\sum \lambda_i \cdot Z_i - Z_0)^2]$$

$$E[(Z_0^* - Z_0)^2] = E[(\sum \lambda_i \cdot Z_i - \sum \lambda_i \cdot Z_0)^2]$$

puisque $\sum \lambda_i = 1$

$$E[(Z_0^* - Z_0)^2] = E[(\sum \lambda_i (Z_i - Z_0))^2]$$

$$E[(Z_0^* - Z_0)^2] = E[\sum_i \lambda_i (Z_i - Z_0) \sum_j \lambda_j (Z_j - Z_0)]$$

$$E[(Z_0^* - Z_0)^2] = [\sum_i \sum_j \lambda_i \lambda_j E[(Z_i - Z_0) (Z_j - Z_0)]] \quad (3)$$

comme le développement de l'équation du variogramme donne

$$\gamma_{ij} = 1/2 E[(Z_i - Z_j)^2]$$

$$\gamma_{ij} = 1/2 E[((Z_i - Z_0) - (Z_j - Z_0))^2]$$

$$\gamma_{ij} = 1/2 E[(Z_i - Z_0)^2 - 1/2 E[(Z_j - Z_0)^2] - E[(Z_i - Z_0) (Z_j - Z_0)]]$$

$$\gamma_{ij} = \gamma_{i0} + \gamma_{j0} - E[(Z_i - Z_0) (Z_j - Z_0)]$$

danc:

$$E[(Z_i - Z_0) (Z_j - Z_0)] = \gamma_{i0} + \gamma_{j0} - \gamma_{ij}$$

En remplaçant l'expression $E[(Z_i - Z_0) (Z_j - Z_0)]$ dans l'équation (3)

on aura:

$$E\left[(Z_0^* - Z_0)^2\right] = \sum_i \sum_j \lambda_i \cdot \lambda_j \cdot [\gamma_{i0} + \gamma_{j0} - \gamma_{ij}] = \sum_i \sum_j \lambda_i \lambda_j \gamma_{ij} + \sum_i \sum_j \lambda_i \lambda_j \gamma_{i0} + \sum_i \sum_j \lambda_i \lambda_j \gamma_{j0} \quad (4)$$

et comme $\sum_i \lambda_i \gamma_{i0} = \sum_j \lambda_j \gamma_{j0}$

On peut mettre en facteur $\sum_i \lambda_i$ ou $\sum_j \lambda_j$ dans les deux derniers termes du 2^{ème} membre de l'équation , on aura :

$$E[(Z_0^* - Z_0)^2] = \sum_i \sum_j \lambda_i \lambda_j \gamma_{ij} + 2 \sum_i \lambda_i \gamma_{i0}$$

Ainsi, la condition d'optimalité est exprimée en fonction du variogramme. Sous la contrainte de non biais, c'est à dire $\sum_i \lambda_i = 1$, on introduit le multiplicateur de lagrange μ . pour avoir le minimum de :

$$1/2 \cdot E[(Z_0^* - Z_0)^2] - \mu[\sum_i \lambda_i - 1]$$

qui s'obtient en annulant les dérivés partielles par rapport aux λ_i et μ . Ce qui

$$\text{donne: } \begin{cases} \sum_j \lambda_j \gamma_{ij} + \mu = \gamma_{i0} \\ \sum_i \lambda_i = 1, i = 1, \dots, n \end{cases}$$

Le système (5) est un système linéaire à n+1 équations et n+1 inconnues, à savoir les n poids λ_i et le multiplicateur de lagrange μ .

Le variogramme γ étant défini positivement, ce système possède une solution unique. Pour obtenir la valeur interpolée par krigeage simple au point 0, on remplace les λ_i calculées, dans l'expression de l'estimateur.

ANNEX 2

3. STATISTIQUE : "STATI"

Ce programme permet de faire les différents calculs statistiques à savoir les paramètres de position , de dispersion et de forme avec les histogrammes de fréquence pour chaque variable afin de mieux connaître sa loi de distribution spatiale.

Parmi les options utilisées par ce programme , on trouve :

- "PREFIX": Faire entrer le préfixe pour le nom du fichier .
- "DATA": Elle est utilisée pour spécifier la variable (ou variables) que le programme utilisera pour les calculs statistiques .
- "EXECUTE": Cette option est commune pour tous les programmes du GEO-EAS. Elle permet d'accéder aux résultats en les affichant sur l'écran .
- "HISTOGRAM": Donne l'histogramme de fréquence de la variable avec les paramètres statistiques affichés sur la droite du graphe .
- "PROBABILITY": Montre le diagramme de la variable en fonction des fréquences cumulées . Elle donne l'ajustement des données à une loi (normale-Log normale).

4. VARIOGRAPHIE :

4.1. Construction des couples: "PREVAR"

La construction des couples est réalisée par le programme prevar . Il donne les classes et la distance moyenne de chacune d'elles . Le fichier de sortie à une extension PCF (Pair Comparaison File) .

Le nombre de couples formés est égale $(N(N-1))/2$ tel que N le nombre d'observation .

Les différentes options de ce programme sont :

- "FILES": spécifie le nom du fichier .
- "VARIABLE": Indique la variable utilisée .
- "EXECUTE": Exécution du calcul .

DESCRIPTION DU LOGICIEL

GEO-EAS

Le GEO-EAS (Geostatistical Environmental Assessment Software) est une collection d'outils pour les études et les analyses géostatistiques. Il est constitué de programmes permettant le calcul statistique (histogrammes, variance, écart-type...), le variogramme, le krigeage, et la cartographie.

Le menu général du logiciel GEO-EAS est le suivant :

GEO-EAS (1 . 2 . 1)			
Geostatistical Environmental Assessment Software			
DATA PREP	PREVAR	CONREC	
TRANS	VARIO	XYGRAPH	
		POSTPLOT	
STAT1	XVALID	HPLOT	
SCATTER	KRIGE	VIEW	
			QUIT
Use arrows key to move cursor , <enter> to select programm			

DATA préparation utilities .

Les différents programmes de traitement de données que contient ce logiciel sont :

- 1. DATA PREP :** Permet l'introduction des données et les manipulations de fichiers (copier, fusionner, effacer ...).
- 2. TRANS:** Peut être utilisé pour diverses opérations sur les données ; (opérations arithmétiques, transformation de variables, format ...).

4.2. Variogramme: "VARIO"

Le fichier PCF du programme PREVAR serait utilisé pour le calcul du variogramme .

Le menu du programme vario est :

- "DATA": Introduire le nom du fichier PCF .
 - "VARIABLE": Spécifie la variable utilisée pour le calcul du variogramme .
 - "TOLERANCE": Donner la distance maximale et minimale ainsi que l'incrément .
 - "EXECUTE": Pour pouvoir afficher les résultats .
 - "TYPE": Choisir le type d'estimateur .
 - "PLOT": Permet de visualiser le variogramme .
 - "MODEL": Permet de choisir le modèle théorique à ajuster au variogramme expérimental , et cela en introduisant les différents paramètres (pepité(Nugé); palier(Sill) ; et la portée (range)) .
- En utilisant l'option "PLOT" , on visualise le variogramme avec l'ajustement .
En utilisant "OPTION" , on donne le titre au graphe obtenu .

5. VALIDATION DU VARIOGRAMME : "XVALID"

L'étape de validation est assurée par le programme "XVALID" . Ce dernier permet de juger si l'ajustement est bon ou mauvais .

L'XVALID nous donne aussi la carte d'erreur de la variable mesurée et celle estimée par Krigeage en utilisant l'option "ERROR MAP".

On dit qu'un ajustement est bon si le Zscor de la moyenne tend vers 0 et le Zscor de l'écart type tend vers 1 .

6. KRIGEAGE : "KRIGE"

Le programme "KRIGE" permet de faire un Krigeage par voisinage glissant .

Parmi les différentes options de ce programme , on trouve :

- "TYPE": Permet de sélectionner le type de Krigeage , et choisir si le Krigeage se fait par bloc ou par point .
- "GRID": Spécifie l'origine du maillage , la taille des cellules ainsi que leurs nombres

- "SEARCH": Cette option spécifie le rayon d'action et le type de distance "variogramme" ou "euclidien".

7. CONREC:

Ce programme utilise le fichier de sortie GRD contenant les valeurs estimées par Krigeage et forme un nouveau fichier "Metacode" pour être ensuite utilisé dans la réalisation de la carte estimée par Krigeage.

ANNEXE 3

P.E, ET NO3 DES EAUX SOUTERRAINES DE LA REGION DE M'SILA

5

	Km	G16.9			
	Km	G16.9			
CE	mmhos/cm	G16.9			
NO3	mg/l	G16.9			
logCE	mmho/cm	G12.3			
675.100000	265.850000	2200.00000	56.0000000	-	3.34
663.250000	262.500000	3500.00000	17.0000000		3.54
669.350000	261.500000	2600.00000	34.0000000		3.41
669.100000	262.400000	800.000000	49.0000000		2.90
665.625000	260.450000	2900.00000	20.0000000		3.46
670.750000	262.150000	800.000000	50.0000000		2.90
674.200000	261.150000	3400.00000	29.0000000		3.53
678.750000	264.650000	1800.00000	21.0000000		3.26
675.575000	261.950000	3100.00000	29.0000000		3.49
676.350000	250.800000	1300.00000	2.00000000		3.11
662.425000	257.725000	2200.00000	115.000000		3.34
677.225000	256.975000	1300.00000	1.00000000		3.11
663.725000	259.150000	3300.00000	20.0000000		3.52
663.200000	254.975000	4200.00000	8.00000000		3.62
671.750000	258.250000	2500.00000	34.0000000		3.40
665.250000	257.150000	2000.00000	18.0000000		3.30
661.950000	252.200000	10300.0000	33.0000000		4.01
668.625000	257.150000	2400.00000	21.0000000		3.38
672.800000	254.600000	5700.00000	4.00000000		3.76
674.550000	251.625000	8000.00000	6.00000000		3.90

ملخص

- تدور هذه الدراسة حول التوزيع الحيزي لنوعية المياه الجوفية لمنطقة المسيلة ذات المناخ الجاف إلى شبه الجاف. الهدف المتوخى من هذه الدراسة هو إظهار الجولان الحيزي للناقلية الكهربائية و عنصر النترات من خلال إنشاء خريطة. سيلان الماء يبدأ من الشمال ليصل إلى شط الحضنة، تتميز هذه المياه بتمعدن عادي من شأنه أن يقلل من نوعية صلاحية هذه المياه للشرب، أما من جانب صلاحيتها للسقي فهي تشكل خطراً معتبراً نظراً للملوحة التربة مما يؤدي إلى نقص في مردودية الفلاحة.

كلمات مفتاحية: جيواحصائي، كريجياج، فاريوغرام، الناقلية الكهربائية، النترات.

Resumé

Notre étude a porté sur la répartition spatiale de la qualité des eaux souterraines de la région de M'sila dont le climat est aride à semi-aride. Le but de cette étude est de monter l'évolution spatiale de la conductivité électrique et de nitrates à travers l'établissement d'une carte. L'écoulement des eaux se fait du Nord jusqu'au Chott El-Hodna, ces eaux caractérisé par une forte minimalisation qui rend les eaux à qualité médiocre de point de vue potabilité, aussi que pour l'irrigation, ces eaux présentent des risques de salinisation élevées par conséquent des effets néfastes sur la production agricole.

Mots clés : géostatistique, Krigeage, variogramme, conductivité électrique, nitrates.

Abstract

Our survey carried on spatial quality underground water distribution of the region of M'sila whose climate is arid to semi arid, the objective of this survey is to display the spatial distribution of the electrical conductivity and nitrates by establishment of a chart. The out flow of waters makes itself of the North until the Chott El-Hodna. This waters are a mediocre quality of the point of seen drink because here high mineral content., as well as for the irrigation, these waters present some elevated salinization risks and therefore of the negatives effects on the agricultural production.

Keys words : geostatistic, Krigeage, variogramme, electrical conductivity, nitrates.