

10/03

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

**ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE**  
**DEPARTEMENT : GENIE HYDRAULIQUE**



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
BIBLIOTHEQUE — المكتبة  
Ecole Nationale Polytechnique

**PROJET DE FIN D'ETUDES**

**Thème**

**VARIABILITE SPATIALE DE  
LA GEOMETRIE  
DE QUELQUES RESERVOIRS  
HYDROGEOLOGIQUES DU HOGGAR**

**(APPLICATION AUX DONNEES  
DE L'OUED TAMANRASSET  
ET L'OUED OUTOUL)**

**Proposé par :**

**M<sup>r</sup>. A.SEMMAR**

**Etudié par :**

**M<sup>ELLE</sup>. S.BAIRI**

**Dirigé par:**

**M<sup>r</sup>. A.SEMMAR**

**PROMOTION 2002/2003**

**E.N.P 10, Avenue HASSEN BADI-EL HARRACH-ALGER**



## Remerciement



- *Nous remercions le centre de Recherche Scientifique et Technique des Zones Arides (CRSTRA) qui a contribué par l'intermédiaire de ses chercheurs associés en l'occurrence Monsieur le professeur MESBAH.M et Monsieur SEMMAR.A, à la réalisation de cette thèse d'ingénieur ;*
- *Je tiens à remercier ici profondément et sincèrement :  
Monsieur RAHMANI, Monsieur NEBBACH ,Madame BENMAMAR .  
A MONSIEUR SEDIRA.H ,mes grands parents,  
parents ,BAIRI.A ,BAIRI.Z,mes frères et mes sœurs.,*
- *Aux enseignants qui ont contribuer à notre formation.*

تدور هذه الدراسة حول الخصائص الهيدروجيولوجية للجهة السفلى لكل من وادي تمنراست و وادي ئوتول، حاولنا إنشاء نموذج لتغيير الوسائط باستعمال الطريقة الجيوإحصائية التي تعتمد على نظرية المتغيرات الجهوية.

الهدف المتوخى من هذه الدراسة هو إظهار الجولان الحيزي لتراص من الطمي المملوء من خلال إنشاء خريطة.

كلمات مفتاحية : جيوإحصائية، كريجاج، فاريوغرام.

### Résumé :

Notre étude a porté sur les caractéristiques hydrogéologiques de Oued Tamanrasset et Oued Outoul, nous avons essayé de modéliser les variabilités de ces paramètres et cartographier les grandeurs par techniques géostatiques basées sur la théorie des variables régionalisées.

Le but de cette étude est de montrer l'évolution spatiale de l'épaisseur du remplissage alluvionnaire à travers l'établissement d'une carte.

Mots clés : Géostatique, Krigeage, Variogramme.

### Abstract :

Our study on the hydrogeology of the low river of Tamanrasset and the river of Outoul, we have try to modelise the variability of these parameters and make maps of sizer by the technical geostatique based on the objective of this study is to display the spatial distribution of the alluvionar filling up by establishment of a chart.

Key words : Geostatics, Kriegeage, Variogramme

# SOMMAIRE

## Introduction générale

## Première partie

### Chapitre I : Rappels des méthodes géostatistiques

I.1.Introduction .....	1
I.2.Language de la géostatistique .....	1
I.3.Définition.....	1
I.4.Notion de base de la géostatistique.....	2
I.4.1.Notions sur la théorie des variables régionalisées.....	3
I.4.2.But de la théorie des variables régionalisées.....	3
I.4.3.Notion de moments.....	3
a. Moment d'ordre 1.....	3
b. Moment d'ordre 2.....	3
I.4.4Conception de la fonction aléatoire (FA).....	4
I.4.5.hypothèses sur la fonction aléatoire.....	4
I.4.5.1.hypothèse de stationnarité.....	4
I.4.5.2.hypothèse d'ergodicité .....	5
I.4.5.3.hypothèse intrinsèque.....	5

<b>I.5.Variogramme</b> .....	6
I.5.1.Définition .....	6
I.5.2.Détermination du variogramme .....	6
I.5.3.Caractéristiques du variogramme .....	7
I.5.4.Comportement du variogramme à l'origine.....	7
I.5.5.Comportement à l'infini.....	9
I.5.6.Comportements particuliers du variogramme.....	11
I.5.7.Modélisation du variogramme.....	12
I.5.8.1.Vérification de la validité du modèle.....	14
<b>I.6.Estimation</b> .....	15
<b>I.6.1.Définition</b> .....	15
<b>I.6.2.Méthodes d'estimation analytique(non probabilités)</b> .....	16
a)Méthode d'interpolation linéaire par triangulation.....	16
b)Méthode d'interpolation par moindres carrées.....	16
c)Méthode d'interpolation polynomiale.....	16
d)Méthode de pondération.....	17
<b>I.6.3.Méthode d'estimation probabilistes (krigeage)</b> .....	19
a)Krigage universel.....	19
b)Krigage simple.....	19
<b>I.6.4.Calcul de la variance d'estimation</b> .....	21
<b>I.7.Conclusion</b> .....	22

## Deuxième partie

### Matériel et méthode

<b>Chapitre II : situation géographique</b> .....	23
<b>II.1.Introduction</b> .....	23
<b>II.2.Situation géographique du Hoggar</b> .....	23
<b>II.3.Climatologie</b> .....	23
<b>II.4.Situation géographique de l'oued Tamanrasset</b> .....	23

II.5.Climatologie.....	23
II.6.Situation géographique de l'oued Outoul.....	25
II.7.Aprçu climatologique.....	26
II.8.Activité économique.....	26
II.9.conclusion.....	26

## Chapitre III :Cadre géologique.

III.1. Introduction .....	28
III.2.Contexte géologique du Hoggar .....	28
III.2.1.Hoggar central polycyclique .....	28
III.2.2.Hoggar occidental.....	30
III.2.3.Hoggar oriental.....	30
III.3.géologique de l'oued Tamanrasset (1 <sup>ere</sup> zone d'étude).....	31
III.3.1.Substratum.....	31
III.3.2.Socle altéré .....	31
III.3.3.Les alluvions.....	33
III.4.Morphologie du oued Tamanrasset.....	33
III.5.Profil géologique à travers un oued .....	36
III.6.Géologie de l'oued Outoul(2 <sup>eme</sup> zone d'etude ).....	37
III.7.Les ensembles géologiques .....	37
III.7.1.Les formations métamorphiques.....	37
III.7.2.Les granites.....	38
III.7.3.Les formations volcaniques.. ..	38
III.7.4.Les alluvions d'oued . . .	38
III.7.5.Morphologie de l'oued Outoul.....	39
III.7.8.Conclusion .....	42

## Chapitre IV :conditions hydrogéologiques

IV.1.Introduction .....	43
IV.2.Formation de l' oued Tamanrasset .....	43
IV.3.Conditions de gisement des eaux souterraines .....	43
IV.3.1.Géométrie et limites du réservoir.....	43
IV.3.2.Notion de nappe d'inféro-flux.....	44
IV.3.3.Caractéristiques hydrodynamiques .....	44
IV.3.4.Les discontinuités des écoulements.....	44
IV.3.5.Fonctionnement hydraulique .....	44

IV.3.6. Ruissellement dans le bassin versant .....	45
<b>IV.5. Eléments hydrogéologiques de l'oued Outoul .....</b>	<b>45</b>
IV.5.1. Socle sain .....	45
IV.5.2. Socle altéré .....	45
IV.5.3. Alluvions d'oued .....	45
IV.5.4. Piezométrie .....	45
<b>IV.6. Aperçu sur les nappes d'infiltration .....</b>	<b>46</b>
<b>IV.7. Condition d'écoulement .....</b>	<b>46</b>
<b>IV.8. Définition de la nappe .....</b>	<b>46</b>
<b>IV.9. Identification du réservoir .....</b>	<b>47</b>
<b>IV.10. Hydrodynamisme souterrain .....</b>	<b>47</b>
<b>IV.11. Conclusion .....</b>	<b>47</b>

## Chapitre V : Apports des études géophysiques

<b>V.1. Introduction .....</b>	<b>48</b>
<b>V.2. Aperçu sur les méthodes utilisées .....</b>	<b>48</b>
V.2.1. Méthode électrique .....	48
V.2.2. Méthodes sismique .....	48
<b>V.3. Résultats des méthodes géophysiques .....</b>	<b>48</b>
V.3.1. résultats sismiques .....	48
V.3.2. Résultats électriques .....	48
<b>V.4. Interprétation quantitative de l'oued Tamanrasset .....</b>	<b>49</b>
<b>V.5. Interprétation quantitative de l'oued Outoul .....</b>	<b>49</b>
<b>VI.6. Commentaire .....</b>	<b>53</b>
<b>VI.7. Conclusion .....</b>	<b>53</b>

## Chapitre VI : Présentation des logiciels

<b>VI.1. Introduction .....</b>	<b>45</b>
<b>VI.2. DESCRIPTION DES LOGICIELS .....</b>	<b>45</b>

# Troisième partie

Applications aux réservoirs hydrogéologiques et discussion des résultats

## Chapitre VII : Analyse statistique des données

<b>VII.1. Introduction .....</b>	<b>55</b>
----------------------------------	-----------



VII.2.Acquisition et critique des données.....	55
VII.3.Examen des paramètres statistiques élémentaires.....	56
VII.4.Ajustement aux lois de probabilité .....	63
VII.5.interpritation .....	65

## Chapitre VIII :Interprétation des résultats

VIII.1.Introduction.....	70
VIII.2.Prévariogramme .....	70
VIII.3.Construction du variogramme .....	70
VII.3.1.variogramme de l'épaisseur de l'oued Tamanrasset.....	71
VII.3.2.variogramme de l'épaisseur de l'oued Outoul.....	72
VII.4.Modélisation du variogramme .....	72
VII.5.Validation du variogramme .....	73
VII.6.interpritation des cartes krigées.....	76
VII.7.conclusion.....	81

**Conclusion générale**

**BIBLIOGRAPHIE**

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
BIBLIOTHEQUE — المكتبة  
Ecole Nationale Polytechnique

# INTRODUCTION GENERALE

## Intruduction générale

Le Hoggar est un massif montagneux, cristallin et cristallophyllien. Du point de vue hydrogéologique, les ressources en eau sont limitées principalement aux aquifères alluviaux. Ce sont des petits réservoirs épuisables dont la recharge est étroitement liée aux manifestations des crues qui se produisent lors des pluies ayant une intensité assez forte. Ces crues sont limitées dans le temps et dans l'espace.

La ville de Tamanrasset rencontre actuellement des grands problèmes quant à la satisfaction des besoins en eau potable de la population qui ne fait que s'accroître.

La connaissance de la géologie, du climat et de ses aléas, de la région conditionne la mise en valeur de ses ressources en eau.

Ce thème a pour but, à partir des données disponibles sur certains réservoirs hydrogéologiques importants du Hoggar en particulier de l'oued Tamanrasset et l'oued Outoul (forages, sondages, prospection géophysique) d'analyser de leur géométrie en vue d'approcher les volumes de roches réservoirs. La méthode d'analyse utilisée sera basée sur l'application des méthodes géostatistiques.

Les objectifs fixés dans cette étude sont :

- ❖ la caractérisation de la variabilité spatiale de l'épaisseur par le biais du variogramme ;
- ❖ La cartographie des grandeurs de l'épaisseur de l'aquifère alluvionnaire de l'oued Tamanrasset et l'oued Outoul en utilisant le krigeage comme technique d'interpolation ;
- ❖ Estimation des volumes de roche éventuellement aquifères .

pour y arriver, nous avons adopté le plan de travail suivant :

- ❖ première partie :

chapitre I: Rappels des méthodes géostatistiques .

❖ Deuxieme partie :Matériel et méthode

Chapitre II :Situation géographique;

Chapitre III:Cadre géologique;

Chapitre IV:Conditions hydrogéologiques ;

Chapitre V: Apports des études géophysiques ;

ChapitreVI :Présentation des logiciels.

❖ Troisième partie : Application aux réservoirs hydrogéologiques et

Interpretations des résultats;

Chapitre VII : Analyse statistique des données;

Chapitre VIII : Interprétations des résultats .

Conclusion Générale

# PREMIER PARTIE

Rappels des méthodes géostatistiques

## Chapitre I :

### Rappels des méthodes géostatistiques

#### **I-1. Introduction :**

Le but principal de ce chapitre est de présenter les méthodes géostatistiques :

- ❖ Une définition des méthodes d'estimation géostatistique ;
- ❖ Notion de base de la géostatistique ;
- ❖ Les hypothèses de la géostatistique .

L'application de la géostatistique permet d'avoir les avantages suivants :

- L'annulation des méthodes d'interprétation plus ou moins arbitraires ;
- L'application d'un estimateur sans biais et de variance minimale ;
- La quantification des erreurs commises sur les estimations ;
- La prise en considération de la notion du support de l'information .

#### **I.2.Langage de la géostatistique**

La géostatistique utilise des termes qui lui sont propres tels que la variable régionalisée, hypothèses de stationnarité, semi-variogramme ou simplement variogramme.

Ce dernier est son outil de base.

#### **I-3. Définition :**

L'approche géostatistique se manifeste à travers la théorie des variables régionalisées qui se fixe comme objectif de caractériser la structure spatiale des phénomènes naturels sous une forme mathématique appropriée et de résoudre le problème d'estimation à partir d'un échantillonnage donnée (Delhomme J.P.1977 in Kante 1997). Par variables régionalisées nous entendons des variables mesurées dans la nature telle que l'épaisseur d'une couche, la profondeur d'un horizon géologique , des anomalies géochimiques ..ect. Alors que la théorie de la géostatistique démarre de l'idée que toutes les variables régionalisées ont un aspect aléatoire.

## I.4. Notion de base de la géostatistique :

### I.4.1. Notions sur la théorie des variables régionalisées

Le terme régionalisée a été utilisé pour la première fois par (Matheron, 1965). On définit 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 (figure .1), sans qu'il soit possible de représenter sa variation par une loi mathématique extrapolable.

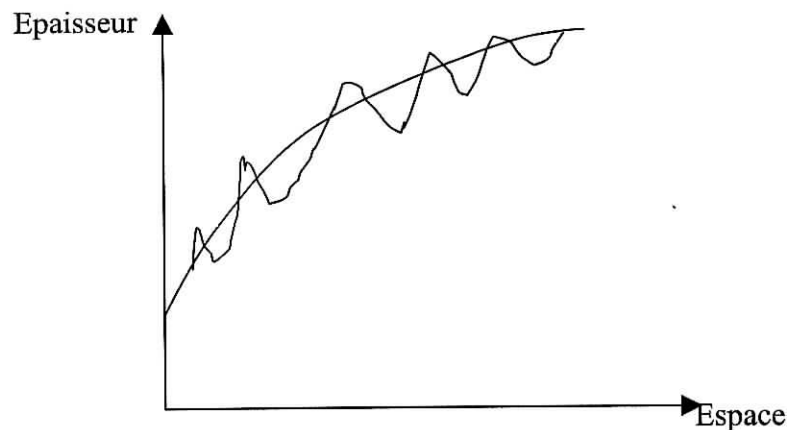


Figure .1 : Exemple de comportement d'une variable régionalisée.  
(Delhomme, 1976 in Baali, 2001)

La variable régionalisée  $z(x)$  est interprétée mathématiquement comme une réalisation d'une fonction aléatoire  $Z(x)$  où les réalisations particulières aux points  $x_i, x_j$  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).

### I.4.2. But de la théorie des variables régionalisées :

Le but de la théorie des variables régionalisées est résumé par Matheron (1965) en trois points essentiels :

- ❖ Définir les bases théoriques permettant de caractériser les structures des phénomènes naturels sous une forme mathématique ;
- ❖ La résolution des problèmes d'estimation qui se posent par des moyens pratiques ;

- ❖ Elles englobent toutes les possibilités ayant des surface les plus lisses jusqu' aux surfaces les plus accidentées .

### 1.4.3. Notion de moments :

#### a. Moment d'ordre 1 :

L'espérance mathématique de la variable aléatoire  $Z(x)$  est une valeur qui joue le rôle de représentante de la moyenne des valeurs de  $Z(x)$  .

On appelle espérance mathématique  $E[z(x)]$  ou  $E(x)$  est la fonction définit par :

$$E(x) = p_1x_1 + p_2x_2 + \dots + p_nx_n = \frac{\sum_{i=1}^n p_i x_i}{\sum p_i}$$

#### b. Moment d'ordre 2 :

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

##### ❖ La variance :

La variance est définit par :

$$VAR(z(x)) = E((z(x) - m)^2)$$

La variance est la mesure de la dispersion (ou de distribution) des valeurs de la variable aléatoire  $z(x)$  autour de la moyenne  $M$ .

C'est à dire :  $E[z(x)] = m(x)$       $x = \{x_i, p_i\}$

##### ❖ La covariance :

Si l'on a deux variables aléatoires  $z(x_1)$ ,  $z(x_2)$  qui ont des variances, elles ont aussi des covariances (Journal 1970 in Ider 1998) :

$$COV[z(x_1), z(x_2)] = E [z(x_1) - m_1] [z(x_2) - m_2]$$

- ❖ On dit que  $z(x_1)$  et  $z(x_2)$  sont indépendantes si  $COV(z(x_1), z(x_2)) = 0$  d'où les deux variables sont dites corrélées ;
- ❖ Si  $COV[z(x_1), z(x_2)] \neq 0$ , alors les deux variables sont indépendantes.



### ❖ Le variogramme :

Si  $Z(x)$  est la valeur de la variable en un point  $x$ , l'expression du variogramme  $\gamma$  pour la distance  $h$  est :

$$\gamma(h) = 1/2 E[(z(x_i + h) - z(x_i))^2]$$

### 1.4.4 Conception de la fonction aléatoire (F.A) :

Une variable aléatoire est une variable qui prend un certain nombre numérique selon une certaine loi de distribution de probabilité.

Chaque valeur de  $Z(x)$  est considérée comme étant une réalisation d'une variable aléatoire, et l'ensemble des variables est appelé fonction aléatoire (F.A).

### 1.4.5. Hypothèse sur la fonction aléatoire :

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

Les hypothèses sont :

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

#### 1.4.5.1. Hypothèse de stationnarité :

La fonction aléatoire est dite stationnaire au sens strict si sa loi spatiale est invariante par translation dans son espace de définition, autrement dit les deux vecteurs à  $k$  composantes de variable aléatoire  $\{z(x_1), z(x_2), \dots, z(x_k)\}$  et  $\{z(x_1+h), z(x_2+h), \dots, z(x_k+h)\}$  possèdent la même loi de distribution à  $k$  variables quel que soit le vecteur de translation  $h$ .

Dans ce cas l'espérance mathématique est indépendante de  $x$

$$E(z(x)) = m$$

La covariance entre les points  $x_i, x_j$  est dépendante uniquement du vecteur distance  $h$  séparant les points  $x_i, x_j$ .

$$E[(z(x_i) - m)(z(x_j) - m)] = C(x_i, x_j)$$

où:

$x_i$ : point de coordonnées  $(x_i, y_i)$  ;

$x_j$  : point de coordonnées  $(x_j, y_j)$  ;

$m$  : moyenne de  $z(x)$  ;

$C(x_i, y_j)$  : covariance de  $z(x)$  ;

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.

#### **1.4.5.2. Hypothèse d'ergodicité :**

L'hypothèse d'ergodicité a été imposée pour faciliter le travail, cette hypothèse consiste à supposer que la réalisation unique étudiée suffit à rendre compte de l'ensemble des réalisations éventuelles.

L'hypothèse d'ergodicité permet alors de déterminer la loi de probabilité de la fonction aléatoire par la connaissance d'une seule réalisation.

#### **1.4.5.3. Hypothèse intrinsèque :**

Une fonction aléatoire admet l'hypothèse intrinsèque si les accroissements de la variable régionalisée  $[z(x+h) - z(x)]$  sont localement stationnaires.

$$\{z(x_i)\} = m \quad \forall x$$

L'espérance mathématique dans ce cas est nulle et la variance est indépendante des points  $x, x+h$

$$E(z(x+h) - z(x)) = 0$$

et

$$VAR(z(x+h) - z(x)) = 2\gamma(h)$$

Avec :

$E$  : espérance mathématique ,

VAR: variance;

$\gamma(h)$ : Fonction du demi- variogramme (ou plus généralement variogramme).

La fonction aléatoire correspondante est dite fonction aléatoire intrinsèque (FAI).

## I.5. Le variogramme :

### I.5.1. Définition :

Le variogramme est l'outil de base de la géostatistique, il représente la variance des accroissements de la variabilité  $z(x)$  quand  $x$  se déplace à travers tout le domaine de définition, le vecteur de translation ( $h$ ) constant en module et direction (Matheron 1965).

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

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} \text{VAR}(z(x_i + h) - z(x_i))$$

Sous l'hypothèse intrinsèque :

$$E(z(x_i + h) - z(x_i)) = 0$$

On obtient

$$\gamma(h) = 1/2 E[(z(x_i + h) - z(x_i))^2]$$

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

### I.5.2. Détermination du variogramme :

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

$$\gamma(h) = \frac{1}{2n(h)} \sum_1^{n(h)} [z(x_i + h) - z(x_i)]^2$$

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 de 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.

### I.5.3. caractéristique 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 essentielles de cet outil.

### I.5.4. Comportement du variogramme à l'origine :

Le comportement du variogramme au voisinage de zéro 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  $\gamma(h)$  :

#### a. Comportement parabolique :

Cette allure parabolique à l'origine caractérise une variable dérivable et continue (figure.2) et avec une variabilité spatiale hautement régulière.

$$\gamma(h) \rightarrow \alpha |h|^2 \text{ quand } h \rightarrow 0$$

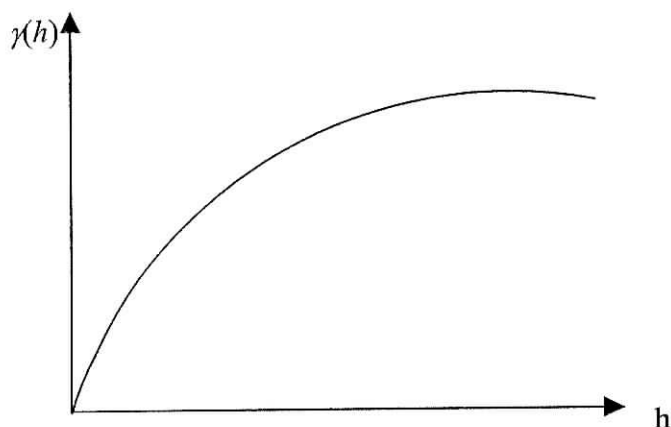


Figure.2 : comportement parabolique (dérivable)

#### b. Comportement linéaire :

L'allure linéaire caractérise une variable moins régulière que la première (figure.3).

La fonction  $\delta(h)$  n'est plus dérivable à l'origine, mais reste en  $h=0$  et en tout  $h$

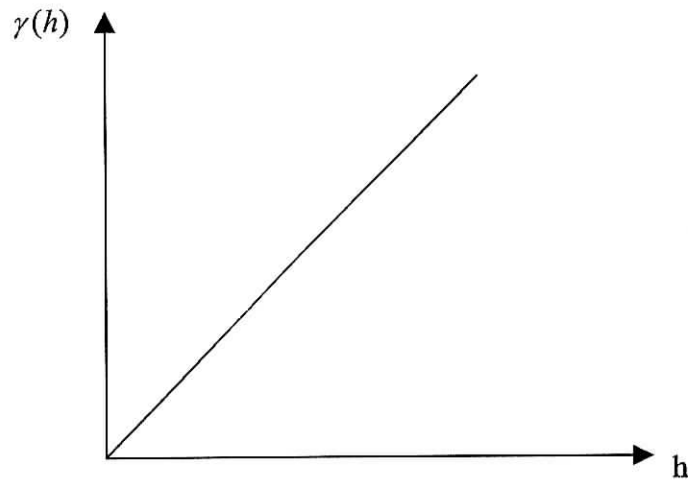


Figure.3 : comportement linéaire

### C. Discontinuité à l'origine :

On peut appeler aussi l'aspect pépité ou  $\gamma(h) = 0$  si  $h=0$  normalement, mais fréquemment présente une ordonné à l'origine non nulle, cette quantité présente l'effet de pépité (figure.4), cet effet pépité est due soit :

- ❖ A une microrégionalisation ;
- ❖ A des erreurs de mesures.

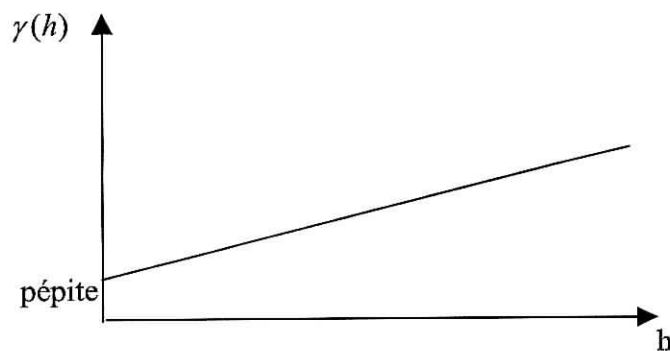


Figure.4: effet pépité

**d. Aspect plat (effet de pépite pur) :**

Dans ce cas la fonction  $\gamma(h)$  se réduit à une droite parallèle à l'axe de distance (figure.5), autrement dit la structure du phénomène est aléatoire pur.



Figure.5: effet pépite pur (aléatoire)

**I.5.5. Comportement à l'infini :**

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

**a. Variogramme borné :**

Dans ce cas, la variogramme se stabilise autour d'une valeur limite appelée palier qui correspond à la variance et à la distance à laquelle ce palier est atteint est appelée portée (figure.6)

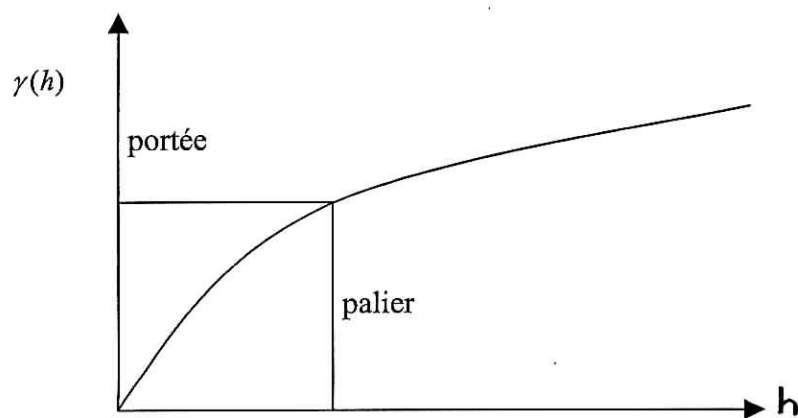
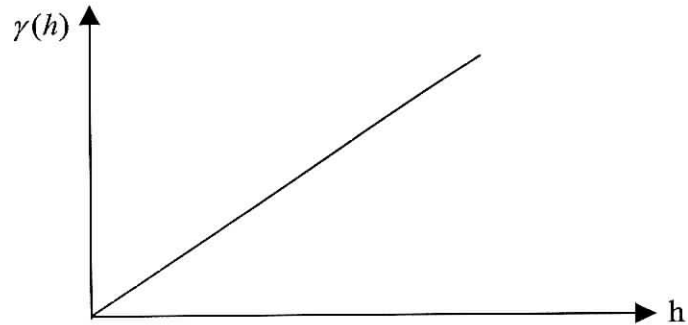


Figure.6. : Variogramme borné

**b. Variogramme non borné :**

Pour le variogramme non borné, il indique que le champ a une variance infinie, et qu'une fonction de variance n'existe pas, seule l'hypothèse intrinsèque est ici acceptable (figure.7).



**Figure.7 : Variogramme non borné**

**Remarque :**

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

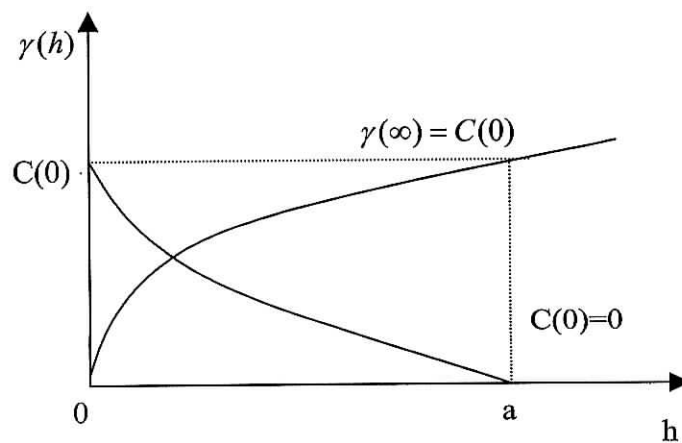
$$\gamma(h) = C(0) - C(h)$$

où

$\gamma(h)$  : Variogramme

$C(h)$  :  $\text{Cov}(z(x_i+h)-z(x_i))$  ;

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



**Figure.8 : Covariance et variogramme**

### I.5.6. Comportements particuliers du variogramme :

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

- ❖ Comportement périodique (figure.9) ;
- ❖ Structures gígones (figure.10) ;
- ❖ Effet de trou (figure.11).

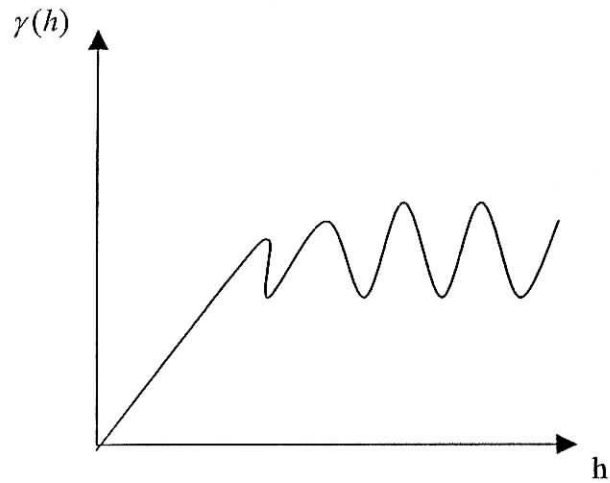


Figure .9 :Comportement périodique

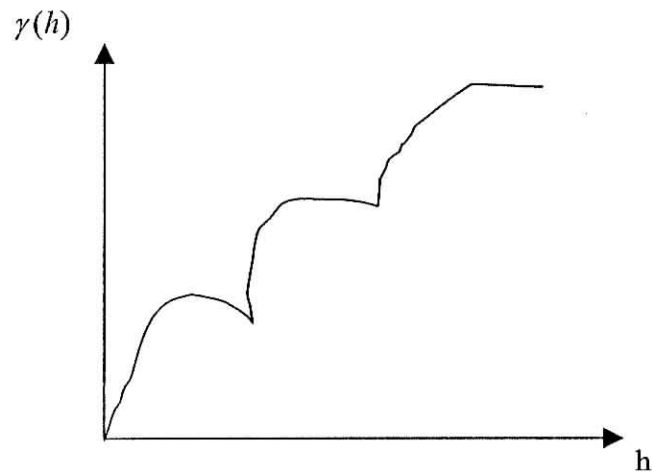


Figure.10 :Structures gígones



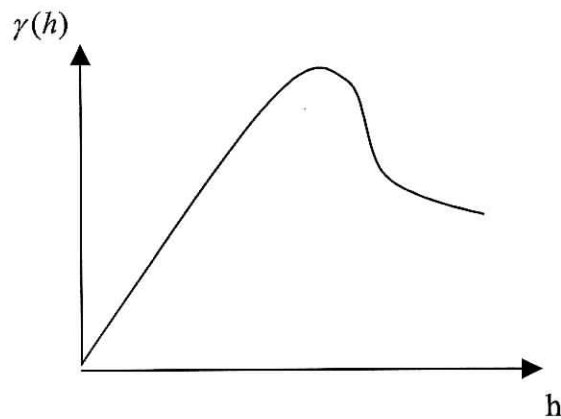


Figure.11 : effet de trou.

Le comportement du variogramme (figure .9) indique l'existence de corrélation négative due à la présence des zones pauvres entourées par zones riches (Delhomme J.P.1976 in Baali.2001).

### 1.5.7. Modélisation du variogramme :

Le besoin d'un modèle de variogramme tient qu'on pourrait avoir besoin d'une valeur de variogramme pour une certaine distance ou dans une certaine direction pour laquelle on ne dispose pas de données expérimentales, il y a quatre types d'ajustement du variogramme.

#### a. Modèle linéaire:

$$\gamma(h) = \omega |h|^2$$

Le modèle linéaire est un modèle sans palier (figure.12)

#### b. Modèle sphérique:

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

et

$$\gamma(h) = \omega$$

pour  $h > a$

Ce modèle présente un schéma de transition avec un comportement linéaire à l'origine (figure.13).

**c. Modèle exponentiel:**

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

C'est un schéma de transition à palier avec comportement linéaire à l'origine (figure.14).

**d. Modèle gaussien:**

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

Le modèle gaussien est un modèle qui présente un schéma de transition à palier avec un comportement parabolique à l'origine (figure.15).

Avec :

$\gamma(h)$  : Variogramme ;

$\omega$  : Le palier de la fonction ;

$a$  : représente la portée du variogramme.

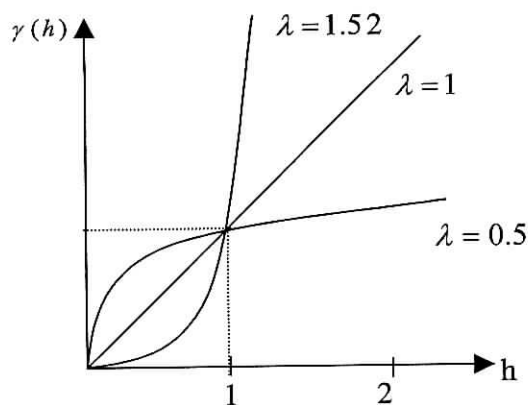


Figure.12 : Modèle linéaire

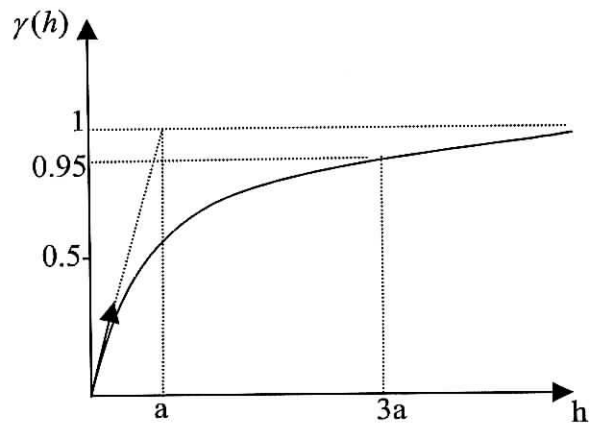


Figure.14: Modèle exponentiel

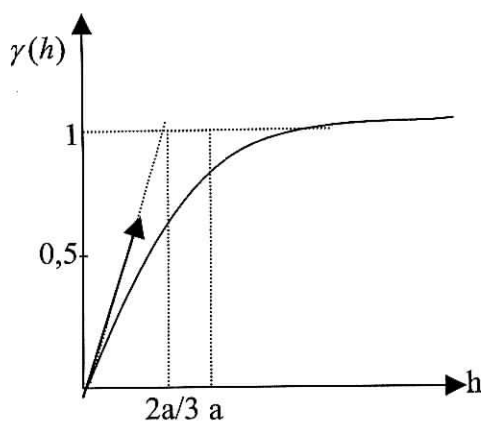


Figure.13 : Modèle sphérique

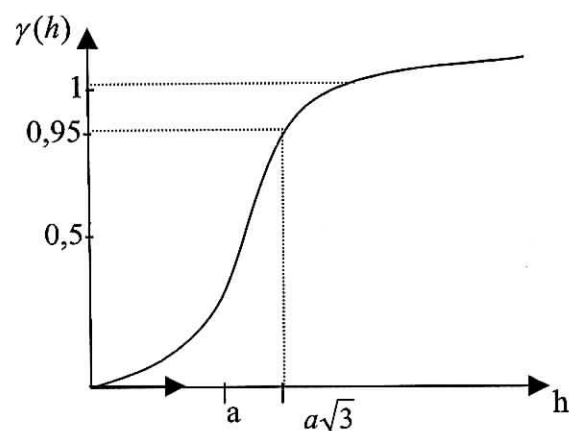


Figure.15 : Modèle gaussien

### I.5.7.2. Vérification de la validité du modèle :

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

Soit la valeur de la variable aléatoire représentant la valeur du phénomène étudié, la vraie valeur de  $Z^*$  est inconnue. En général, on cherche à l'estimer par la valeur connue  $Z$ . Nous commettons alors une erreur notée  $E=[Z-Z^*]$  considérée comme une variable régionalisée. Certes, nous ne pouvons pas calculer cette erreur, mais nous essayons de maîtriser sa dispersion afin de choisir le meilleur estimateur possible. Le meilleur estimateur est celui qui donne une espérance proche de zéro, estimateur non biaisé et une variance minimale.

On dit que l'on a un bon ajustement si :

1) La moyenne de non biais tend vers 0 :

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

2) Le rapport de variance tend vers 1 :

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

Avec :

$\sigma_k^2$  : est la variance du krigeage ( variance d'estimation ).

## I.6. Estimation :

### I.6.1. Définition :

Le problème d'estimation consiste à déterminer la valeur de la quantité  $Z_0$  pour un point quelconque qui n'a pas été mesuré, en utilisant les valeurs disponibles. Alors pour

estimer la valeur  $Z_0$  au point  $x_0$ , plusieurs méthodes peuvent être utilisées parmi ces différentes méthodes on trouve :

### **I.6.2. Méthodes d'estimation analytique (non probabilistes) :**

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

#### **A) Méthode d'interpolation linéaire par triangulation :**

Cette méthode consiste à former un réseau de triangles ( G.Castany, 1982) dont les sommets sont représentés par les points mesurés les plus proches, le tracé des courbes isovaleurs se fait entre les points des sommets à travers les cotes de ces triangles.

#### **B) Méthode d'interpolation par moindres carrées :**

Cette méthode basée sur une hypothèse, qui considère le phénomène réel est en fait régulier, mais qu'il est affecté d'une erreur  $\varepsilon(x)$  de moyenne nulle et sans auto corrélation spatiale on a :

$$Z(x) = n(x) + \varepsilon(x)$$

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

$$\sum [Z^*(x) - Z(x)]^2 \text{ minimum}$$

#### **C) Méthode d'interpolation polynomiale :**

La méthode consiste à ajuster, une fonction polynomiale aux données expérimentales  $x$  et  $y$  supposées être régulières.

L'utilisation de cette méthodes est difficile, car elle suppose que les donne sont bien réparties.

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

Avec :

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

$A_i$  : coefficient d'ajustement ;

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

#### **D) Méthode de pondération :**

L'utilisation de cette méthode basé essentiellement sur une hypothèse d'homogénéité du phénomène .

Ces méthodes sont destinées à calculer la valeur d'une variable spatial  $Z(x)$  par la moyenne pondérée des autres valeurs échantillonnées , parmi ces méthodes on a :

D.1. Méthode des polygones de thiessen ;

D.2. Méthode de pondération en fonction de la distance.

#### **D.1. Méthode des polygones de thiessen :**

Elle consiste à déterminer un certain nombre de polygones formes à partir des médiatrices des droites reliant les points adjacentes (Reminieras, 1986 in Baali, 2001), la valeur expérimentale  $Z$  est supposée être la moyenne représentative de polygones. Cette méthode présente deux inconvénients majeurs : l'un est dû à sa relative difficulté de mise en œuvre notamment lorsqu'on a des lacunes de mesure dans certains points, l'autre c'est qu'elle a été conçue pour être utilisée à grande échelle dans des régions, où le phénomène est homogène.

$Z$  = valeur de la variable partielle ;

Avec :

$$\bar{Z} = \frac{\sum S_i Z_i}{S_T} \quad \bar{Z} = \text{moyenne de la variable.}$$

où :

$S_i$  : surface de polygone élémentaire.

$S_T$  : Surface totale de domaine d'étude.

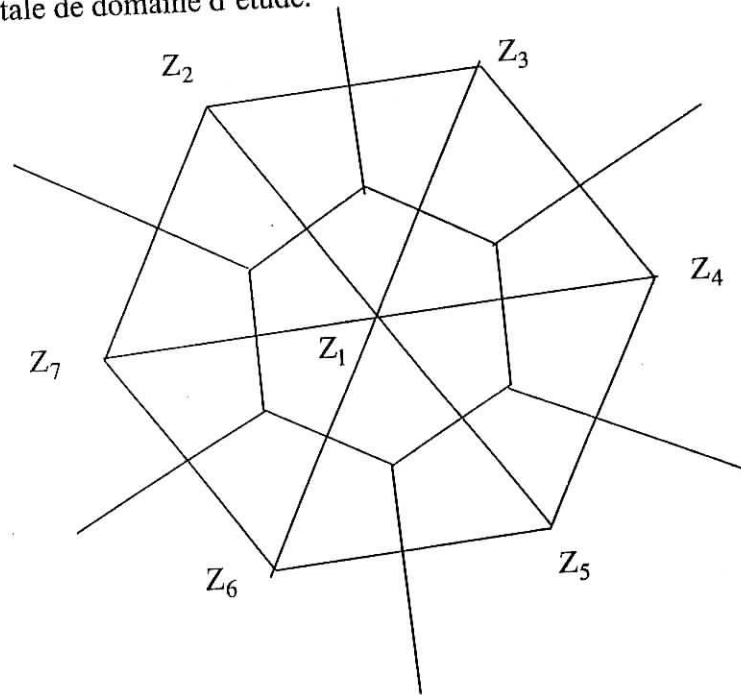


Figure.14 : polygone de thiessen.

### D.2. Méthode de pondération de la distance :

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

$$Z_0 = \frac{\sum g(d_i) Z_i}{\sum g(d_i)}$$

Avec :

$g(d_i)$  : fonction de pondération ;

$d_i$  : distance séparant le point  $Z_0$  et le point  $Z_i$ .

Et

$g(d) = \frac{1}{d}$  : interpolation par inverse des distances ;

$g(d) = \frac{1}{d^2}$  : interpolation par inverse des carrés des distances.

### 1.6.3. Méthodes d'estimation probabilistes (krigeage) :

Le krigage est une technique de détermination des coefficients des pondération pour l'estimateur optimal, il s'agit donc de déterminer les points de pondération qui donneront la meilleure estimation  $Z_0$  au point  $x_0$ .

$$Z_0^* = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z_i$$

Avec :

$Z_0^*$  : estimateur au point  $x_0$ .

$\lambda_i$  : coefficient de pondération.

$Z_i$  : valeur observée au point  $i$ .

$n$  : nombre de points observés.

On distingue deux type de krigage :

#### 1.6.3.1. Krigage universel:

Dans le cas des phénomènes non stationnaires, où l'hypothèse intrinsèque n'est plus vérifiée, et par conséquent la moyenne n'est plus constante et le variogramme n'est pas seulement fonction de  $h$ .

#### 1.6.3.2. Le krigage simple :

Ce type de krigage s'effectue dans deux conditions où l'espérance mathématique est supposée être constante est égale à  $m$ , et la condition d'optimalité de l'estimateur.



a. Condition de non-biais :

$$E(Z_0^* - Z_0) = 0$$

La condition de non biais est assurée en important la somme des poids égale à l'unité, c'est ainsi que le krigeage est un estimateur sans biais.

b. Condition d'optimalité :

$$\text{VAR}(Z_0^* - Z_0) = 0 \quad \text{minimum.....(*)}$$

La variance d'estimation doit être minimale

Le développement de l'équation (\*), et l'introduction de la définition du variogramme on obtient :

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

Ainsi la condition d'optimalité est exprimée en fonction du variogramme sous la contrainte de non biais, c'est à dire  $\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1$ , on introduit le multiplicateur de Lagrange

( $\mu$ ) pour avoir le minimum de :

$$E((Z_0^* - Z_0)^2) - \frac{\mu}{2} (\sum \lambda_i - 1)$$

Après qu'on annule les dérivées partielles par rapport à  $\lambda_i$  et  $\mu$ , ce qui donne .

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^n \lambda_j \gamma(x_i - x_j) + \mu = \gamma(x_i - x_0) \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j = 1 \end{cases} \quad i = 1 \wedge n \quad (**)$$

On pose:

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

Le système (\*\*) s'écrit sous la forme matricielle suivante:

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

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

Le variogramme étant défini positivement ce système possède une solution unique, pour obtenir la valeur interpolée par le krigeage simple au point  $x_0$  on remplace les  $\lambda_i$  calculée dans l'expression de l'estimateur.

#### I.6.4. Calcul de la variance d'estimation:

D'après l'équation (\*\*) et l'équation (\*) on obtient :

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

L'écart type sera donnée par :

$$\sigma = \sqrt{\text{VAR}(Z_0^* - Z_0)} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \lambda_i \gamma(x_i - x_0) + \mu}$$

Dans l'hypothèse de la loi de distribution normale (Gaussienne) des erreurs d'estimation l'intervalle de confiance à 95%. s'écrit :

$$Z_0 = Z_0^* \pm 2\sigma = \sum \lambda_i Z_i \pm \sigma$$

### 1.7. conclusion :

- ❖ Les méthodes probabilistes est l'application du formalisme des fonction aléatoires à la reconnaissance et à l'estimation des phénomènes naturels ;
- ❖ Les méthodes non probabilistes s'appliquent par conséquent de la même manière aux variables aléatoires et ne donnent pas la variance d'estimation c'est à dire , pas d'intervalle de confiance sur la valeur estimée.

# DEUXIEME PARTIE

## Matériel et méthode

## 2<sup>eme</sup> partie

### Introduction

Dans cette seconde partie , nous présenterons le matériel utilisé ainsi que les méthodes appropriées afin d'aboutir aux objectifs visés .le matériel consistera en le présentation des logiciels utilisés. L'origine des données sera également élucidée avec des méthodes qui ont permis de les obtenir.

Les objectifs visés seraient d'étudier par ~~des~~ les analyses géostatistiques, les remplissage alluvionnaires de quelques réservoirs hydrogéologiques du Hoggar parmi les quels on a sélectionné deux aquifère. Il s'agit de l'oued Tamanrasset et de l'oued Outoul. Ce choix est justifié d'une part de l'importance de ces oueds et d'autre part de la disponibilité de résultats de prospections sur ces sites. Cette démarche reposera l'étude des chapitres suivants :

## CHAPTRE II SITUATION GEOGRAPHIQUE

### II.1.INTRODUCTION

#### ❖ Aperçu historique

Le Hoggar ou Ahaggar, est le nom historique du pays contrôlé par la confédération des touaregs kel ahaggar .

En 1932, Conrad Kilian a été le premier à identifier le hoggar comme une vaste boutonnière antécambrienne.

### II.2.Situation géographique du Hoggar

Le Hoggar couvre une partie du domaine saharien , il est compris entre :

Les latitudes 19° et 26° Nord, et les longitudes 2° et 12° Est (figure 15 ).

Soit une surface d'environ 500.000 km<sup>2</sup> (Yabia, A.1991), il est limitée à l'Est par la Libye , au Sud par le Mali et le Niger, à l'ouest par le Tanezrouft et au nord Ilizi et Ain Salah .

## II.3.Climatologie

Du point de vue climatologique, le Hoggar est divisé en trois zones climatiques (Sollah, Y. 1985), il a été distingué :

- ❖ Une zone centrale au climat relativement doux et arrosé grâce aux effets de l'altitude (2916m au mont Tahat) ;
- ❖ Les basses plaines périphériques à climat chaud et précipitations rares ;
- ❖ Les reliefs de bordure à climat également chaud et qui enregistrent quelque fois de faibles précipitations.

## II.4.Situation géographique de l'oued Tamanrasset (1<sup>ère</sup> zone d'étude )

La wilaya de Tamanrasset est située à 2060 km au sud Est d'Alger. Elle est limitée au Nord par les wilaya de Ghardaïa et Ouargla, à l'Est par celle d'Ilizi et à l'Ouest par la wilaya d'Adrar et au Sud par les frontières Algéro-Malienne et Algéro -Nigérienne. Elle est située en général entre les méridiens 1° et 8°E, 19° et 29° Nord (figure 15).

Le zone d'étude est limitée à l'amont par un ancien barrage ( Florimont) et à l'aval par le barrage souterrain de l'inferoflux de Tamanrasset à 6 Km au Nord de la ville.

La zone prospectée par la C.G.G en 1972 : a 8650 m de longueur.

L'oued Tamanrasset coule en direction Nord Sud et partage la ville en deux zones : la zone Nord et la zone Sud.

## II.5.Climatologie

La climatologie est un facteur indispensable dans l'étude hydrogéologique d'une région donnée .

L'étude des différents éléments du climat (pluviométrie, température ....) est tirée de l'Office National de la Météorologie ( O.N..M) période 2001.

### II.5.1.Température

La station de Tamanrasset est située à 1400m d'altitude et dispose d'une série d'observation assez longue . Les valeurs absolues sont enregistrées aux mois de Janvier – 6.6C° et le mois de Juillet 41.6C°.

### II.5.2. Humidité

Le taux de saturation de l'air en vapeur d'eau dans la région de Tamanrasset est très faible .

Les valeurs moyennes mensuelles de l'humidité pendant cette période variant entre 20 et 28 % .En été elle descend jusqu' à 16% au moins de Juillet. La moyenne maximale de l'humidité est constatée au moins de Janvier 45.5% .

Le déficit de saturation dans la région est très considérable, il favorise ainsi d'avantage le pouvoir évaporant des eaux superficielles .

### II.5.3. Evaporation

L'estimation de la tranche d'eau évaporée dans le bassin versant d'étude a été évaluée en se basant sur les mesures de l'évaporation d'une surface d'eau libre.

On constate que la tranche d'eau évaporée mensuellement s'élève de 210 mm au mois de Janvier à 471 mm au mois de Juillet , le total de la tranche d'eau évaporée annuellement atteint 4.0m.

### II .5.4. Précipitation

Le bassin versant de l'oued Tamanrasset se trouve dans une région climatique saharienne. La pluviométrie annuelle est très faible ; la fréquences des jours de pluies est très faible .

Le régime plüviométrique dans le bassin versant est en général faible. La moyenne annuelle des valeurs observées est de l'ordre de 48.0mm.

### II.5.5. Le vent

Les vents de sable sont fréquents de Février à Mai et soufflent sur une période de 50 à 60 jours par an .Ce phénomène contribue à l'avancée des dunes de 5 mètres par an .Il est incontestable que les vents de sable et les écarts de température, constituent un handicap et une contrainte pour l'activité traditionnelle (agriculture, artisanat.....) .

## II.6.Situation géographique de l'oued Outoul ( 2<sup>eme</sup> zone d'étude)

L'oued Outoul est situé à 20Km environ au Nord Ouest de la ville de Tamanrasset (figure 15)et qui se place entre les coordonnées suivantes :

Longitude 5° 15' et 5°30'E ;

L'altitude 22°45'et 23° N.

Il s'agit de la partie amont de la nappe de l'oued Outoul qui correspond à une gouttière topographique. Elle est limitée à l'amont et à l'aval par deux seuils naturels soulignés par des ramifications de l'accident du 4°50' pour la partie en amont la superficie égale à 524 Km<sup>2</sup> avec un périmètre 126 Km .

## II.7. Aperçu climatologique

La région d'Outoul est aride .Les précipitations sont rares , elles sont de l'ordre de 55mm par an .L'évaporation est intense ( plus de 2000 mm/ an ), pour les variations mensuelles de température le mois Janvier représente le mois le plus froid de l'année avec une température minimale de 12° en moyenne alors que les mois de Juillet , Août et Septembre avec une température moyenne de 34° représentent les mois les plus chauds de l'année période 1984-1993 Office National de la Météorologie (O.N .M. Tamanrasset ) .

## II.8. Activité économique

La wilaya de Tamanrasset connue pour son aspect commercial et touristique présente en outre une activité agricole assez peu développée, la surface agricole utile de la wilaya est de 3458 Ha . De plus la population est en continuelle croissance , le nombre d'habitants est de 145741 et serait en 2010 de 448000 habitants(Yahia.A 1991).

La demande en eau est par conséquent de plus en plus importante et les possibilités d'un développement économique à Tamanrasset sont liées à la mise en valeur de ses ressources hydrauliques.

## II.9. Conclusion

L'Ahaggar , par sa situation au centre du Sahara subit un climat aride caractérisé par ses hautes pressions et ses faibles précipitations, donc les deux régions de Tamanrasset et Outoul situées au Hoggar sont caractérisées par un climat relativement doux et arrosé .



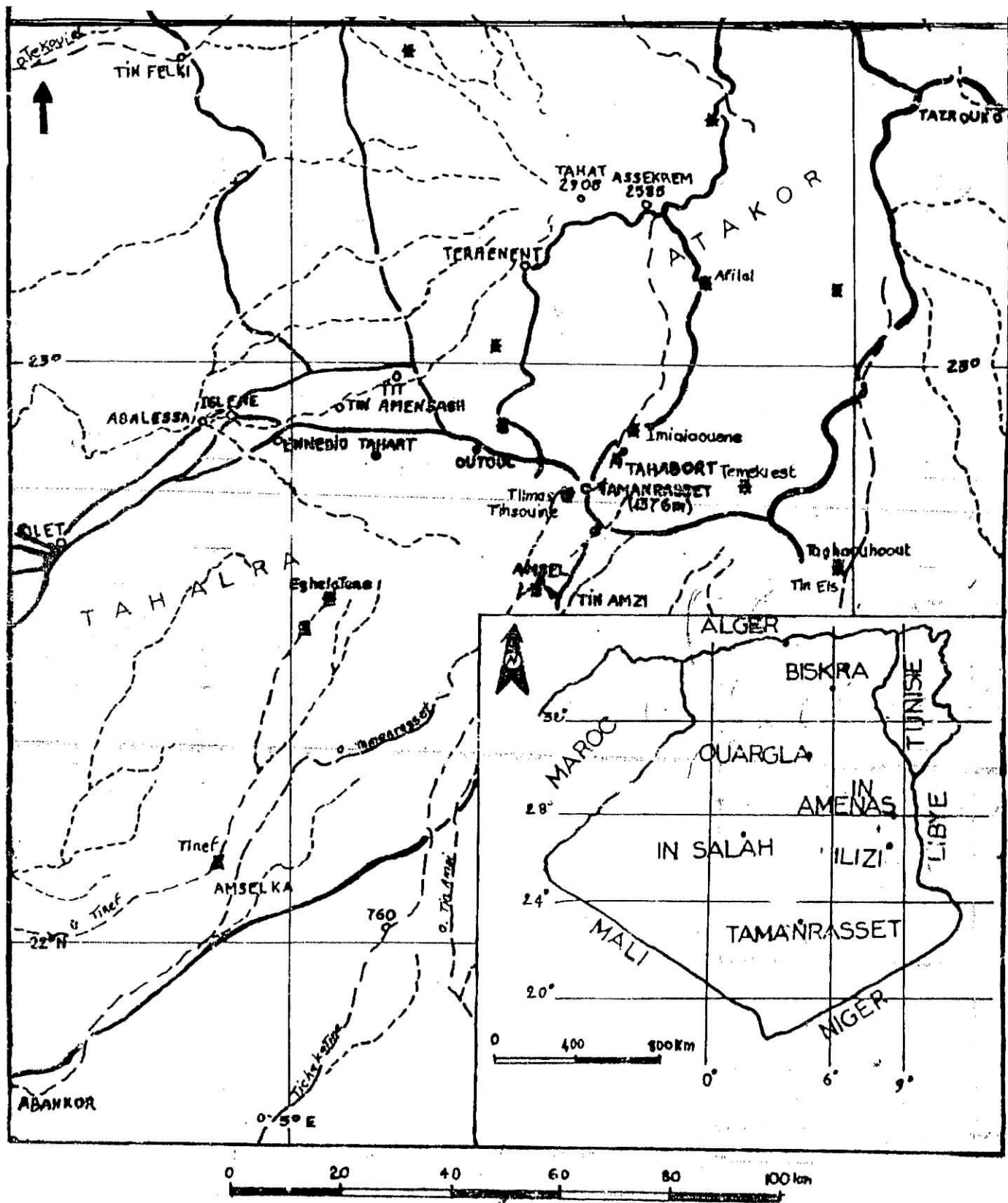


Figure 15 : plan de situation.  
 (In, Benmalek. M ,Kcemi.A 1993 )

## CHAPITRE III

### CADRE GEOLOGIQUE

#### III. 1. INTRODUCTION

La géologie africaine a été marquée ,ces dernières années par les notions contrastées de craton ancien (1800Ma au minimum) et de ceinture mobile (vers 600 Ma), Hoggar fait partie de la zone mobile qui borde à l'Est le craton de l'Ouest africain (J.Boissonnas 1974).

Dans ce chapitre , nous décrivons la différents domaines structuraux du Hoggar.

#### III.2.Le contexte géologique du Hoggar

La structure d'ensemble du hoggar est formée par la juxtaposition de compartiments longitudinaux séparés par des grandes accidents subméridiens et mylonitiques qui traversant tout le bouclier.

Trois grands domaines structuraux ont été définis, (figure .16). On distingue :

- ❖ Domaine central (Hoggar central polycyclique) ;
- ❖ Domaine occidental (Hoggar occidental ou chaîne pharusienne) ;
- ❖ Domaine oriental (Hoggar oriental ou chaîne tiririenne).

##### III.2.1. Hoggar central polycyclique

Il est limité , à l'Ouest par l'accident du 4°50' et à l'Est , par l'accident du 8° 30'.

Ce domaine est subdivisé en trois grandes zones qui sont d'Ouest en Est :

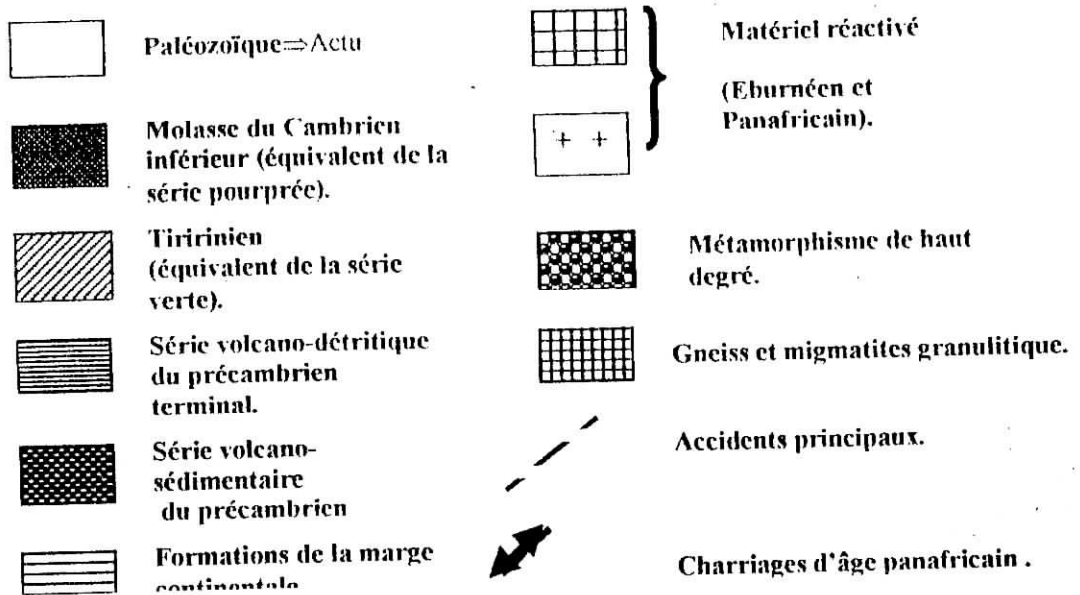
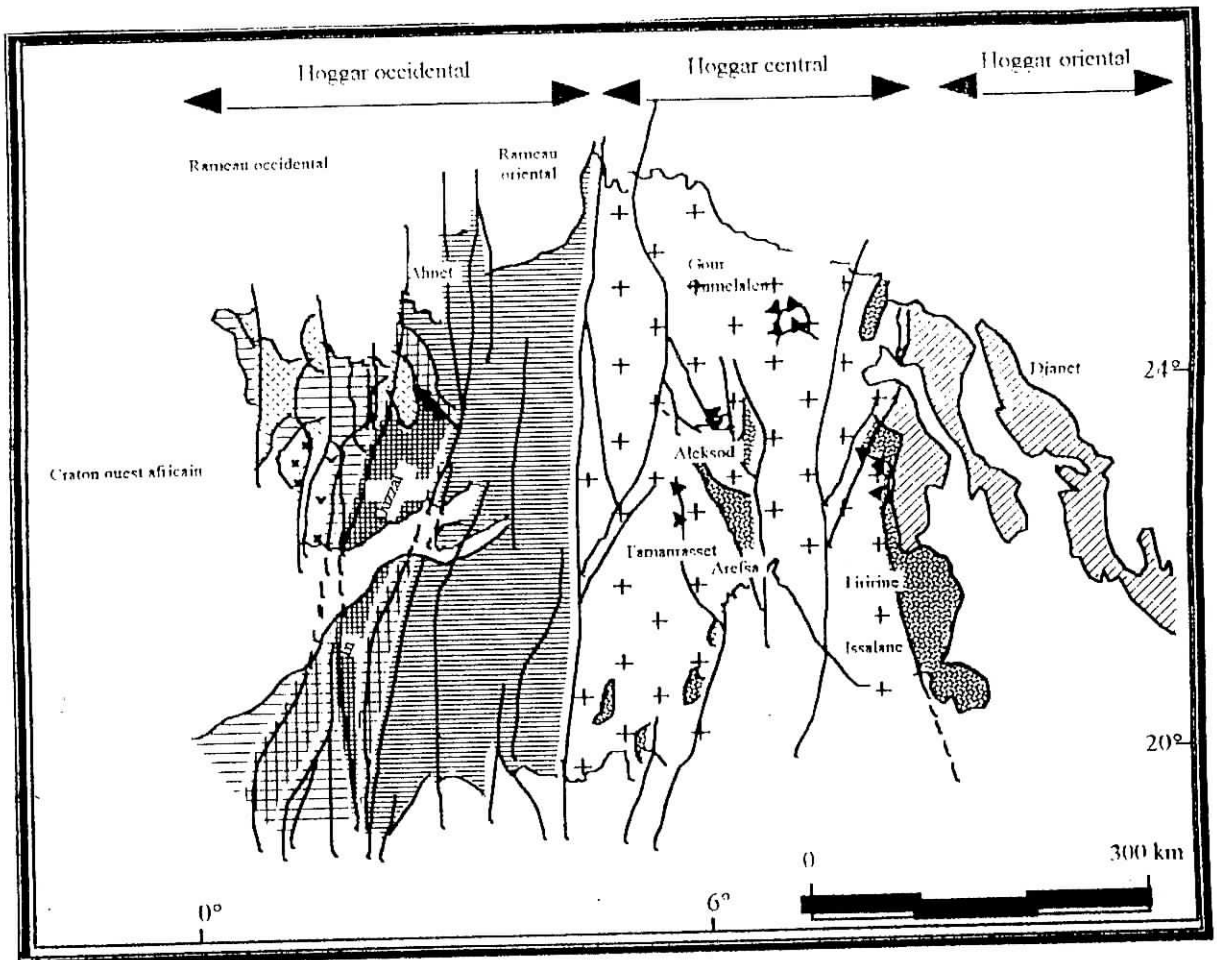
###### III.2.1.1.La zone Tefedestt-Atakor

Cette zone est caractérisée par des granitoïdes d'âge présumé pan-africain qui recoupent des métamorphites dans lesquelles , G.M.Vittel (1974) a distingué deux séries :

La série de l 'Arrechoum : elle contient des gneiss et des reliques de granulites .

La série de l'Amisinasséne : on y trouve des métasédiments.

Un autre groupe associe aux formation pan – africain localisé dans la feuille d'In Takalkaba et d'Issalése où on distingue plusieurs corps basiques et ultrabasiques intercalés tectoniquement.



**Figure 16 : Esquisse géologique du Hoggar**  
(Bertrand et Lassere ,1976 in Saighi .O,1984)

### III.2.2. La zone Egéré-Arefsa

Cette zone comporte trois parties :

L'Alesksod et le Tazoulet : on y retrouve la série de l'Arrechoum, avec des orthogneiss polycycliques, dans la série de l'Aleksod, on trouve des métasédiments (900Ma) ;

La série de Torha : dans cette série, les noyaux sont formés des gneiss rubanés et des gneiss ocellés ;

La série de l'Arefsa occidental et la région de l'Afedfada, on y reconnaît des formations épimétamorphiques.

### III.2.3. La zone orientale Gour – Oumellalen Temasint

Cette zone est formée par une série à gneiss, et une série à micaschistes (2000Ma).

### III.2.2. Hoggar occidental

Il est limitée, à l'Ouest par la suture avec le craton Ouest africain, et à l'Est par l'accident de 4°50'.

Il est défini comme étant la chaîne « pharisienne » d'âge panafricain et comporte trois sous-ensembles.

#### III.2.2.1. Le rameau occidental

Il est formé par des terrains de socle, gneissiques d'âge éburnéen (2000Ma), des terrains volcano-sédimentaires mais aussi, une molasse panafricaine qui forme la série pourprée.

#### III.2.2.2. Le mole d'Inouzzal

Il inclut les terrains les plus anciens, avec des noyaux archéens, comportant des gneiss granitiques.

#### III.2.2.3. Le rameau central

On trouve, surtout des granites qui occupent plus de 50% de l'ensemble du rameau, et aussi des formations métasédimentaires et métavolcaniques rapportées au « pharisien » qui surmontent des noyaux d'âge éburnéen.

### III.2.3. Hoggar oriental

On distingue, dans ce domaine, trois unités :

Le mole d'Issalane : il est constitué par deux formations :

- ❖ Une formation gneissique
- ❖ Une formation métasédimentaire .

La série de tiririne : cette série repose en discordance sur le pré- tiririnen de Tafassasset. Elle est formée d'arkoses conglomérats, et calcaires à stromatolites non métamorphiques.

Le socle pré – Tiririnen de Tafassasset :ce socle est supposé éburnéen , il comprend des métasédiments métavolcanites, roches plutoniques.

## II.3. Géologie de l'oued Tamanrasset ( 1<sup>ère</sup> zone d'étude )

Le bassin versant de Tamanrasset couvre une superficie d'environ 500Km<sup>2</sup>.

Les différentes formations géologiques qui prédominent dans la zone d'étude (figure17) se superposent comme suit :

### III.3.1.Substratum

Le toit du substratum gneissique n'a pas une allure déterminée .Il plonge par endroit et remonte dans d'autres cela est dû à une altération poussée de la roche par endroit atteignant une épaisseur de 17.0 m tandis que dans d'autres endroits, elle est nulle voir chapitre V Fig 23

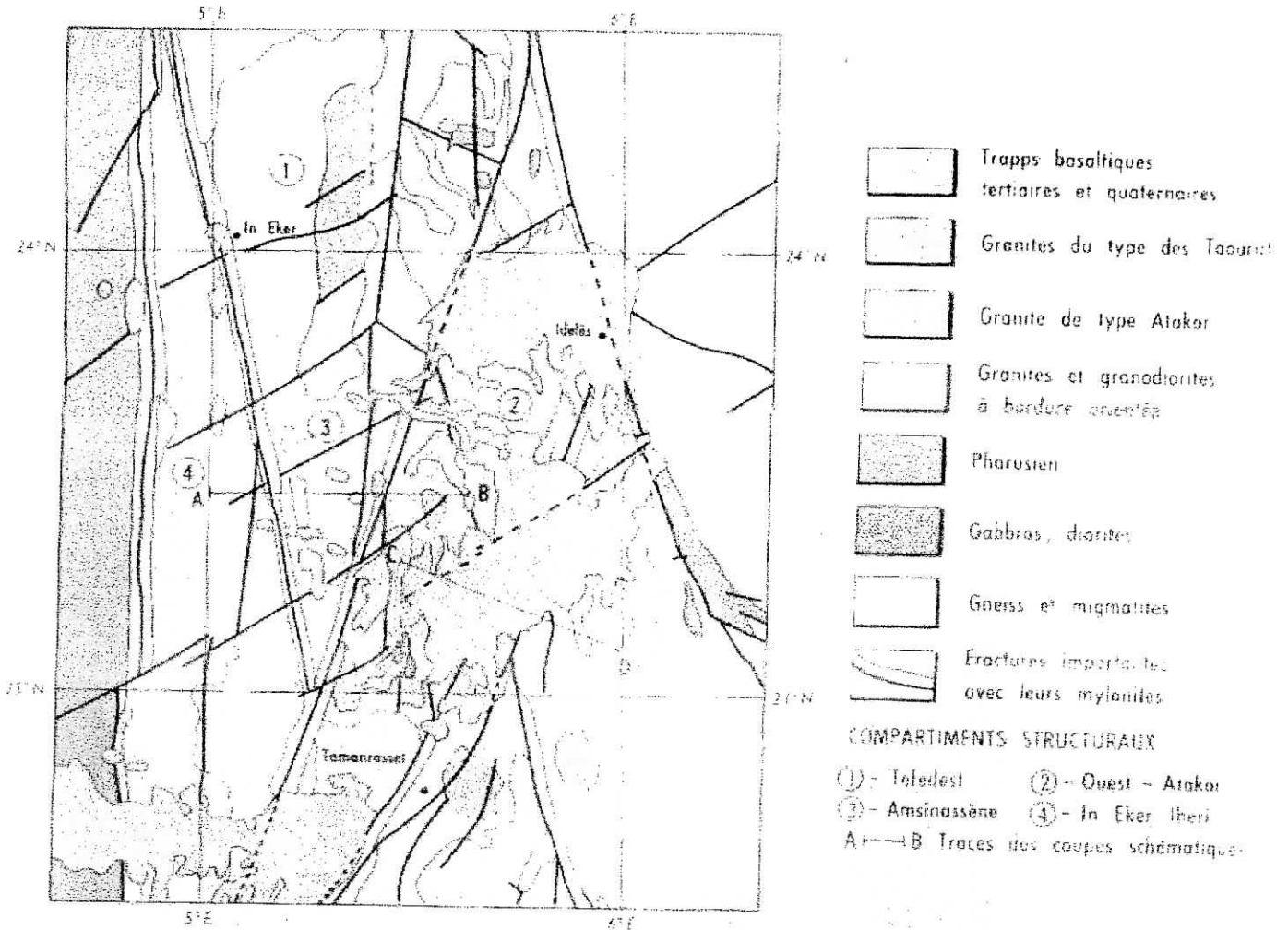
La roche gneissique altérée s'effrite à la main tandis que la roche saine est très dure.

Sur la couche altérée repose une épaisse couche d'alluvions en rive droite , cette couche est composée essentiellement de limon, sur cette rive on assiste a une remontée du substratum , l'épaisseur de la couche alluvionnaire est de l'ordre de 6m.

En rive gauche le substratum plonge , dans cette zone les alluvions sont hétérogènes composés de sable propre moyen, grossier plus ou moins graveleux et endroit on rencontre de gros galets.

### III.3.2.Socle altéré (formation intermédiaire)

L'altération transforme les gneiss et micaschistes antécambrien du substratum en formation meuble . Il s'agit en fait de l'association conjointe d'une perméabilité d'interstice et de fissures .



**Figure 17 :schéma structural du Hoggar central A 1/200 000**  
(In Saighi.O1984)

### III.3.3. Les alluvions

Elle sont constituées de fragment de roches arrachées au massif de l'Atakor extraordinairement variées par leur dimension , composées essentiellement de granite, de quartz ,de feldspath et des paillettes de micas moins visibles. Le gneiss produit une arène très voisine contenant une plus grande proportions d'élément fin .Ces alluvions basaltiques moins bien classées vont du galets au sables moyen (figure.18).

Ces matériaux se déposent selon deux modes principaux :

- ❖ Les plus grossiers sur de fortes épaisseurs dans les lits d'oueds où ils forment le siège d'infero-flux importants ;
- ❖ Les autres dans de larges baignoires ou sur des plateaux bas, en pellicule mince, laissant affleurer de points en points le substratum .

Les matériaux transportés puis déposés proviennent des actions érosives du vent, de l'eau et de l'écart thermique , sur les massif du bassin versant.

### III.4. Morphologie du l'oued Tamanrasset(figure 19)

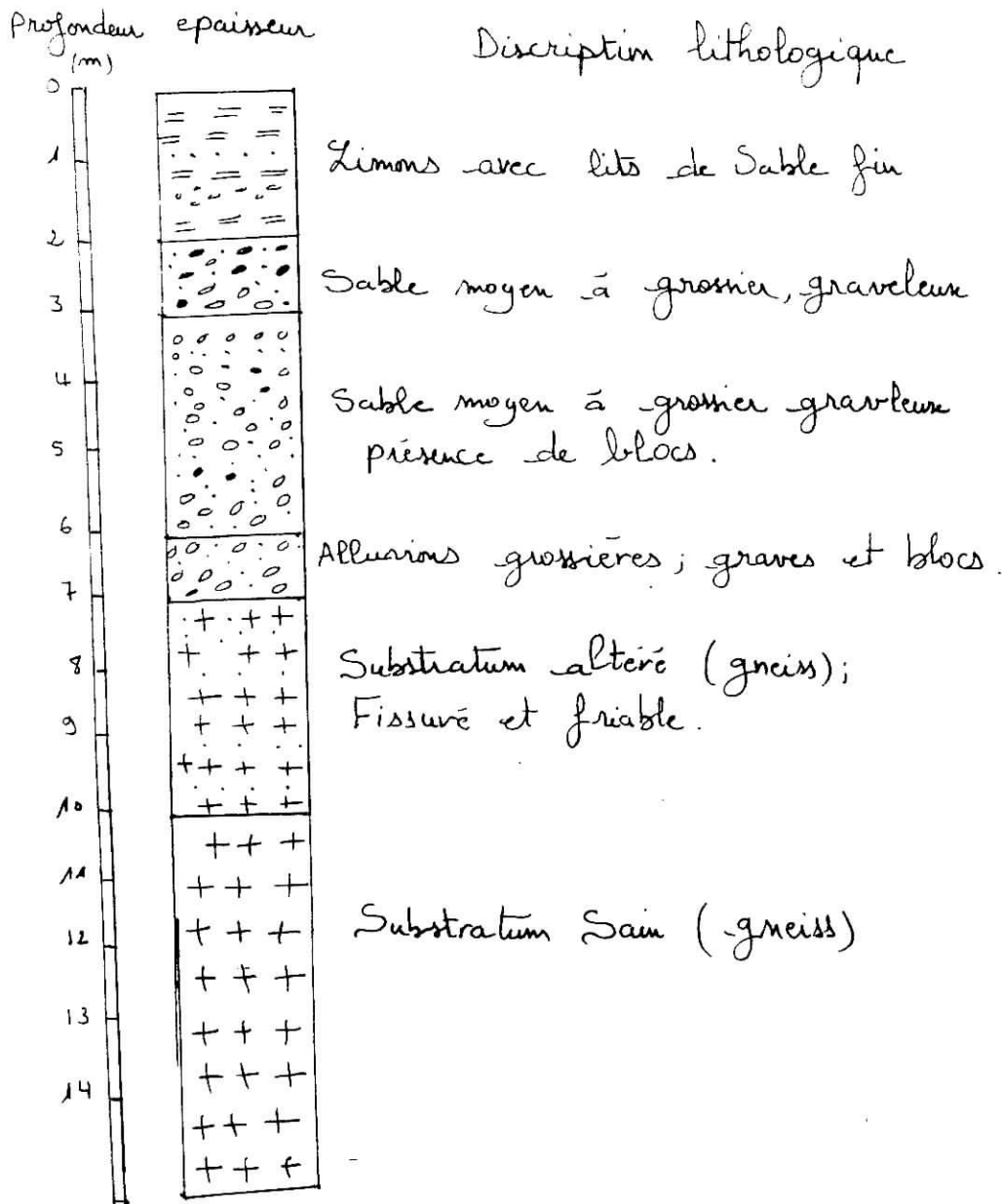
La cuvette considérée au sens large , correspond à tout le remplissage alluvionnaire situé à l'amont de l'oued.

Elle est encaissée entre les bordures gneissiques de la vallée de l'oued Tamanrasset .

D'un point de vue géomorphologique, la cuvette se distingue du relief limitrophe, l'oued a primitivement creusé son lit dans le substratum avant les dépôts sableux successifs.

L'écoulement de l'oued se fait du Nord au Sud sans méandres .

La pente moyenne du lit est faible ,environ 5<sup>0</sup>/<sub>00</sub> et sa surface est légèrement inclinée vers la rive gauche ; ce qui déporte latéralement l'écoulement superficiel des crues .



**Projet : Tamanrasset**

**Sondage N° :ST 4**

**Cordonnées : x=12615m y=11320**

**ST Sondage mécanique**

**Figure 18 : Reconnaissance géologique fiche de sondage , (ENHYD . 1990)**



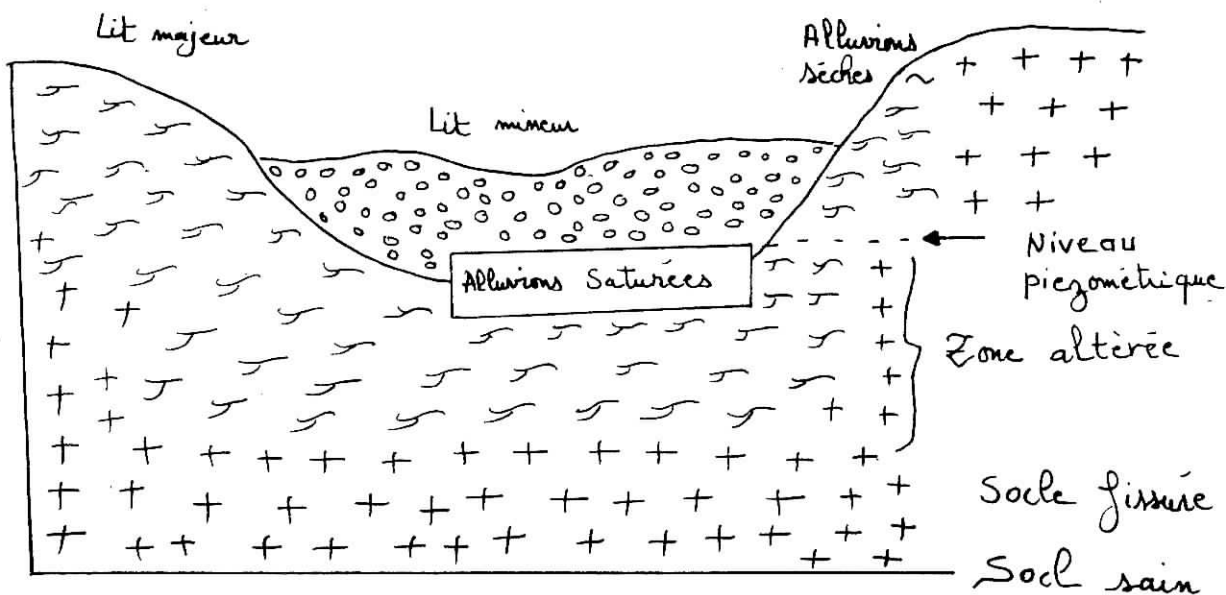


**Figure 19 :Cuvette de l'oued Tamanrasset (affleurement de gneiss)**

### III.4.Profil géologique à travers un oued

Le profil géologique habituel dans un oued montre successivement de haut en bas trois (03 ) niveaux superposés dont les caractéristiques hydrodynamiques sont très inégales (figure 20) :

- ❖ Les dépôts alluviaux à dominante quartzitique, caractérisés par une bonne perméabilité (les épaisseurs variant de 10 à 20 m et une granulométrie diminuant d'amont en aval).
- ❖ Une frange d'altération du substratum immédiat, sa nature lithologique essentiellement et dont l'épaisseur, qui peut atteindre 30m (A. Levassor, 1971) est liée à l'ampleur de l'accident tectonique au quelle est associée ;
- ❖ Un socle fissuré qui passe progressivement vers le bas au socle sain.



**Figure 20 : Profil géologique à travers un oued ( cas de l'oued Tamanrasset )  
(in Cornet ,1961)**

## III.5.Géologie de l'oued Outoul

Notre secteur d'étude appartient au Hoggar central polycyclique limité à l'Ouest par l'accident du 4°50' ; ce dernier souligne une large bande mylonitique submeridienne . Le Hoggar central polycyclique est caractérisé par une évolution polycyclique, depuis l'éburnéen jusqu'au panafricain (figure 17). Il comprend des formations très métamorphisées du précambrien à savoir des granitoïdes suggariens de différents âges, des formations volcaniques, de la fin cénozoïque et début quaternaire ainsi que des dépôts quaternaires.

### III.5.1.Les ensembles géologiques

#### III.5.1.1.Les formations métamorphiques

Les terrains métamorphiques sont représentés par deux séries appartenant à l'ensemble du suggérai :

- Une série intérieure de l'Arrechoum ;
- Une série supérieure de l'Aleksod.

##### III.5.1.1.1.La série de l'Arrechoum

Elle est caractérisée par , une disposition monoclinale de direction NW et un pendage NE , elle comprend trois formations d'âge protérozoïque inférieur :

- Une formation des gneiss rubanés , avec intercalation des marbres et d'amphibolites ;
- Une formation métasédimentaire comprenant des marbres, des pyroxénites , des quartzites des micaschistes et des gneiss ;
- Une formation des gneiss ocellés.

##### III.5.1.1.2. La série de l'Aleksod

Elle composée par des formations d'âge protérozoïque moyen de bas en haut on distingue :

- Des amphibolites massives, recoupées par des pegmatites ;
- Une formation gneissique qui débute localement par des quartzites à moscovite ;
- Une formation calcomagnésienne formée d'amphibolites massives des pyroxénites et des gneiss ;
- Des gneiss verres leucocytes à moscovite ;
- Une formation métasédimentaire qui débute par des gneiss, surmonté par des micaschistes des marbres et des quartzites des gneiss amphibolitiques à grenat.

### III.5.2. Les granites

La chaîne suggarienne est recoupée par des venues granitiques, les plus anciens granites sont liés aux grandes zones des migmatites et sont syntectoniques (650-600Ma) granites d'Aguenar les autres sont moins importants, mais plus intensifs et sont représentés par les granites dites Taourirt.

### III.5.3. Les formations volcaniques

La présence de deux centres volcaniques bien individualisés ; d'une part des épanchements basaltiques qui couvrent la moitié supérieure du bassin versant de l'oued Outoul formant les zones de reliefs (plateau d'Assekrem) d'autre part, ils occupent les parties aval du bassin versant.

Notre zone d'étude étant traversée par une bande mylonitique le volcanisme y est représenté par des basaltes alcalins.

### III.5.4. Les alluvions d'oueds

Les alluvions d'oueds sont assez développées dans les parties moyennes des bassins versants comme c'est le cas à Outoul.

Le fond des oueds est recouvert par un matériel détritique mal calibré, qui est remanié et bouleversé d'une manière chaotique à chaque crue.

Le profil géologique type dans une vallée alluviale du Hoggar montre habituellement de haut en bas :

- (a) Des alluvions sableuses d'épaisseur 10 à 20m qui surmontent :
- (b) Une couche d'altération du socle 10 à 30m, cette dernière repose sur :
- (c) Un socle fissuré, qui passe progressivement à un socle sain.

Dans la zone étudiée, le niveau (b) est peu développé de sorte que l'aquifère alluvial d'Outoul amont repose presque immédiatement sur le bed - rock, sain.

Les deux versants de la vallée, de pente régulière relativement faible, sont constitués des dépôts d'alluvions d'une ancienne terrasse.

Les petites falaises, qui bordent le lit mineur, montrent des niveaux stratifiés d'alluvions argileuses, des graviers et galets dont l'épaisseur peut atteindre 6 à 8m.

La figure 21 montre :

- ❖ Sable argileuse ou sables fins (1 à 2m) ;
- ❖ Sables moyens à grossiers (8 à 14m) ;
- ❖ Sables grossiers (3 à 9m) ;
- ❖ Galets et sables grossiers (3 à 4m) ;
- ❖ Socle altéré (2 à 4m) ;
- ❖ Socle sain.

### **III.6.Morphologie de l'oued Outoul (figure 22)**

La géomorphologie de la région d'Outoul est caractérisée par un relief plus ou moins monotone , où l'on peut distinguer deux partie séparées par le village d'Outoul :  
Une partie amont , et qui correspond à notre zone d'étude qui entre dans la première zone morphologique, le lit de l'oued y est encaissé et la pente est de 2% ;  
Une partie aval de pente globale faible (0.1%) et qui est caractérisée par un faible encaissement de l'oued, les rives étant peu élevées et le lit de l'oued assez plat.

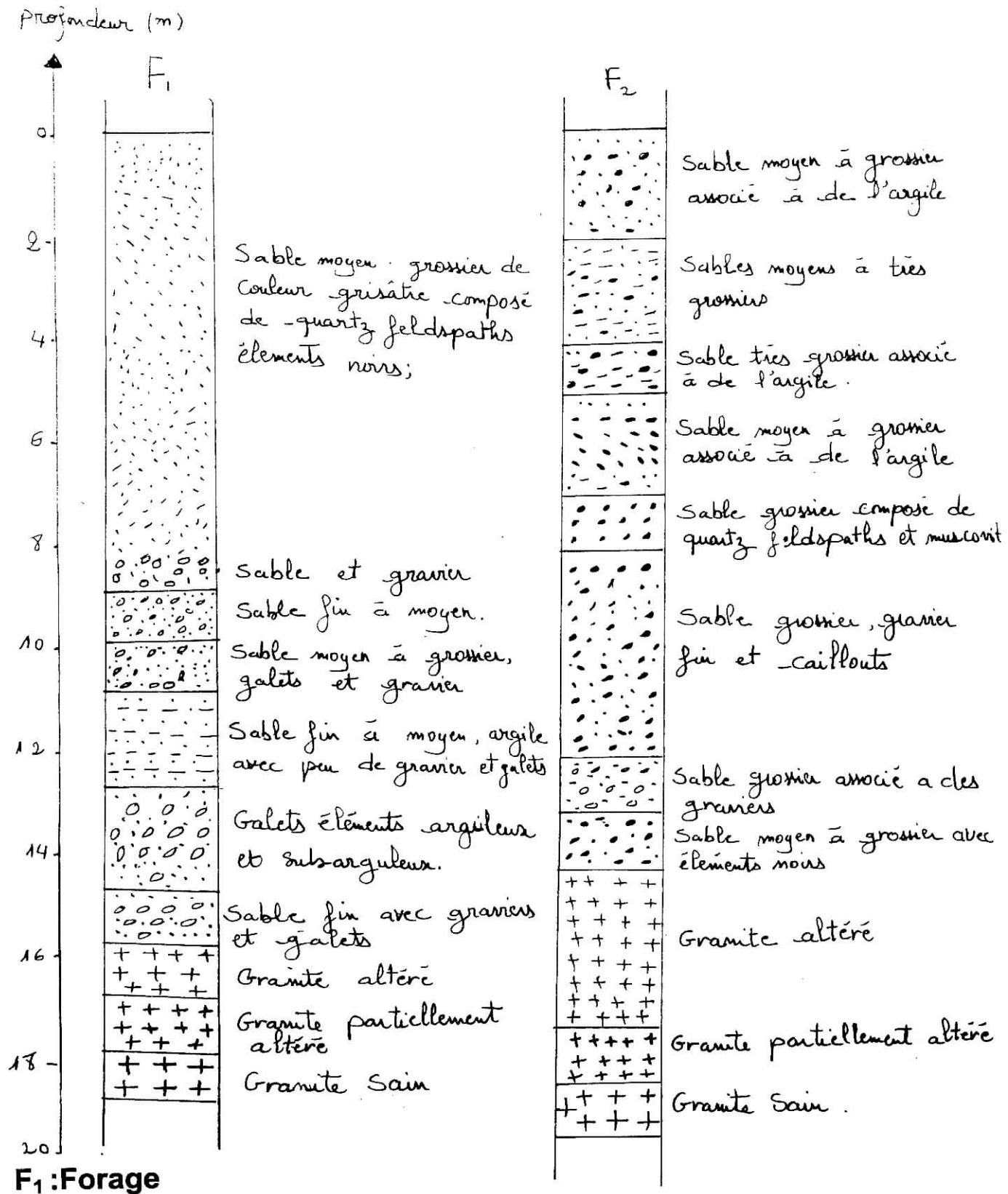
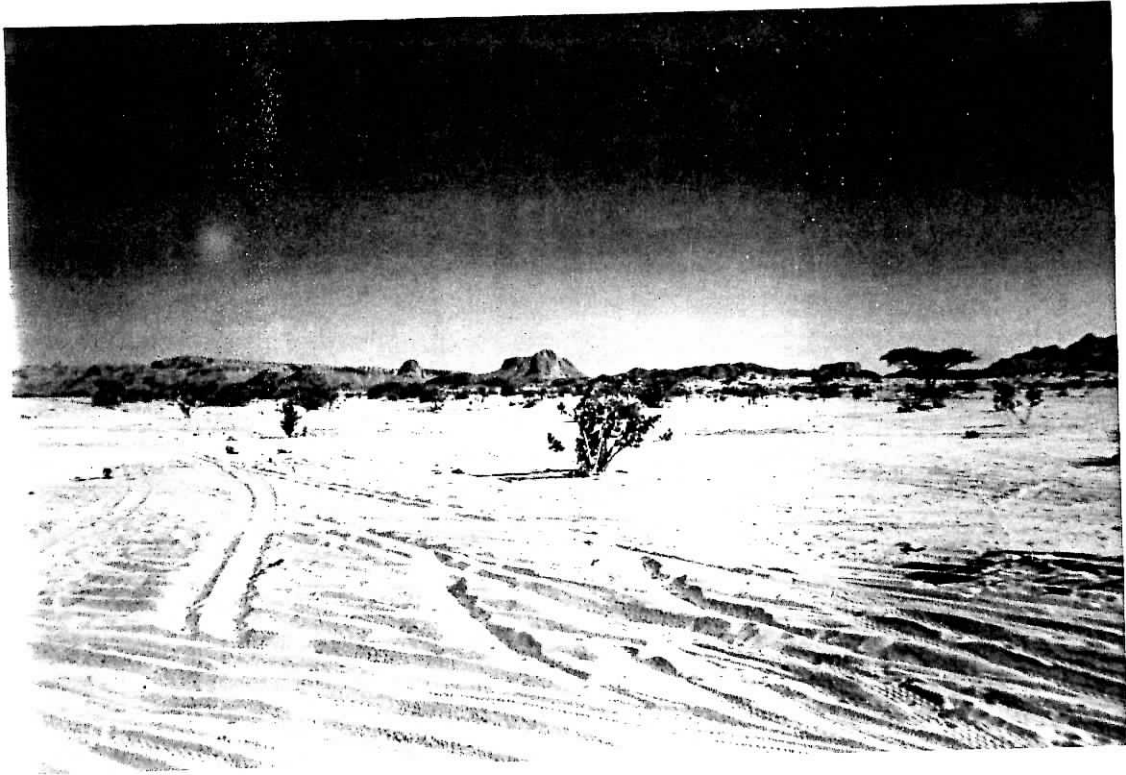


Figure 21 : log stratigraphiques (Oued Outoul)  
(ETHLA1979)



**Figure 22 :cuvette de l'oued Outoul (affleurement de granit)**

### III.7. Conclusion

En guise de conclusion , nous retenons que :

L'oued Tamanrasset note une certaine hétérogénéité du remplissage alluvionnaire et surtout une hétérogénéité du socle précambrien qui constitue le bed -rock .Elle est due au fait que la région constitue une zone de passage entre gneiss et migmatites.

L'oued Outoul comporte d'une part, un remplissage alluvionnaire formé d'un matériel détritique provenant du démantèlement des formations environnantes et d'autre part un socle précambrien qui forme le substratum imperméable constitué des roches métamorphiques, éruptives ou volcaniques.



## Chapitre IV

### Conditions hydrogéologiques

#### IV.1. INTRODUCTION

Les oueds du Hoggar présentent une particularité dans leur morphologie. Leur tracé débute sur les parties élevées du massif par une pente forte et un lit bien marqué. Ces oueds finissent souvent par traverser dans leurs cours aval aplanis et profondément dégradés, des surfaces de pénéplaines et leur tracé devient difficilement identifiable.

Les trois faciès d'alluvions ayant un intérêt hydrogéologique sont :

- ❖ Les graviers et galets tapissant le lit de l'oued et localement associés à des sables ou des matériaux fins (argiles et limons) ;
- ❖ Les graviers propres et sable moyen à grossier ;
- ❖ Les argiles graveleuses, ou graviers argileux .

D'un point de vue classement des alluvions , les dépôts présentent une large gamme granulométrique allant du sable fin au gravier de taille centimétrique.

La matrice, quand elle existe est, le plus souvent argileuse et rarement limoneuse.

#### IV.2. Formation de l'oued Tamanrasset

L'oued Tamanrasset prend source depuis le versant sud des reliefs volcaniques de l'ATAKOR . Plus en aval , il longe par sa rive gauche, le massif de L'Adriane et passe dans une large vallée en approximatif des villages de Sourou et Tabarkat avant de contourner la ville de Tamanrasset par son flanc Ouest (Lelubre.M.1952).

#### IV.3. Conditions de gisement des eaux souterraines

##### IV.3.1. Géométrie et limites du réservoir

L'aquifère de Tamanrasset correspond à une entaille dans le socle cambrien gneissique et granitique.

Le lit de l'oued est entièrement comblé par du matériel détritique essentiellement granitique . L'aquifère est délimité dans sa partie aval par un rétrécissement lié à la présence d'un seuil rocheux (quartzites ) plus résistant à l'érosion qui va conditionner le fonctionnement du réservoir.

### IV .3.2. Notion de nappe d'inféro-flux

La mise en place de ce type de nappe s'explique tout d'abord par l'extension du bassin découpé en amont dans le massif de L'Assekrem ( ruissellement important en période de crue) et par le développement des alluvions grossières .Il faut signaler que le lit majeur de l'oued emprunte presque la totalité de la largeur des alluvions (200 à 600m) ; par ailleurs, ce lit n'est réellement activé qu' après passage d'une crue qui s'étale sur l'ensemble de la cuvette. Le ruban d'alluvions fonction <sup>ne</sup> alors comme un vaste drain collecteur de toute l'eau environnante.

### IV.3.Caractéristiques hydrodynamiques

Les forages et les piézomètres atteignent largement le substratum dans la région .Ils ont également des profondeurs de 20 à 30m.Le passage alluvions au socle altéré n'est pas très net.

Les essais de pompage effectués sur les forages, localisés au de la ville Tamanrasset ont donné les résultats suivants (Besbes 1991) :

$$T=0.97 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}(\text{essai descente}) ;$$

$$T=2.06 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}(\text{essai descente}) .$$

### IV.3.4.Les discontinuités des écoulements

Ces discontinuités sont représentées essentiellement par deux principaux seuils qui jalonnent l'oued Tamanrasset .

❖ Seuil du barrage florimond .

Il se situe à l'extrême amont de l'agglomération, à la sortie aval du versant sud de L'Assekram. Il met en évidence une surface, alluviale en amont de L'Adriane entaillée dans les gneiss (0.5Km<sup>2</sup> sans débit superficiel). La base des alluvions se trouvant au dessus du seuil rocheux favorise leur vidange rapide en raison également de leur pente.

❖ Seuil à l'entrée de l'Adriane.

Il s'agit plus d'un resserrement des rives (100m) que d'un seuil proprement dit . En amont , il délimite un aquifère presque' aussi étendu ( appelé souvent réservoir Tamanrasset amont ) que l'aquifère de L'Adriane .Néanmoins, ses ressources y sont moins importantes .

### IV .3.5.Fonction hydraulique

La nappe superficielle qui coule dans les alluvions de l'oued est alimentée par le vaste bassin versant à l'amont du barrage florimont et par les amenées de l'oued Tizalain, affluent de l'oued Tamanrasset .Il faut signaler la présence dans la région de sources minéralisées effervescentes (source Chapuis à quelques kilomètres à l'Est de l'oued , puits au voisinage de Tamanrasset ) .Il existe donc des fractures du socle qui laissent sourdre des eaux juvéniles se mélangeant à l'eau de la nappe superficielle .

L'eau de cette nappe est exploitée dans la partie aval ,de la zone par quelques puits et une foggara qui est actuellement desséchée. Cette eau sert essentiellement à l'approvisionnement des jardins de la coopérative (C.G.G.1972) .

L'étude faite par Levassor (1971) a estimé le débit d'infiltration à environ 15l/s. Or déjà à l'époque, on pompe environ 25l/s dans la nappe.

La baisse du niveau piézométrique est due à la surexploitation de la nappe. Actuellement le débit de la nappe n'est que de 10l/s (in rapport ANRH, 1999)

Il admettait par ailleurs un coefficient d'emménagement moyen de  $5 \cdot 10^{-2}$ , ce coefficient comme la perméabilité varient beaucoup d'un point à l'autre de la nappe.

#### IV.3.6. Ruissellement dans le bassin versant

L'écoulement superficiel est conditionné généralement par le milieu physique du bassin versant, l'intensité de la pluie et l'état de saturation du sol.

### IV.4. Eléments hydrogéologiques de l'oued Outoul

#### IV.4.1. Socle sain

Le socle granitique observé en surface à travers des affleurements est franchement imperméable.

#### IV.4.2. Socle altéré

On a la formation des arènes granitiques meubles favorables à une accumulation d'eau. La circulation des eaux peut alors avoir lieu à travers la fissuration ouverte souvent importante.

#### IV.4.3. Alluvions d'oued

Elles forment le réservoir principal et sont encaissées dans l'assise granitique.

#### IV.4.4. Piézométrie

Les niveaux statiques observés au niveau de plusieurs puits montrent que la surface de la nappe est peu profonde, son niveau moyen est estimé à partir du lit à 2m environ.

#### IV.5. Aperçu sur les nappes d'inféro-flux

On appelle inféro-flux une nappe comprise dans un aquifère alluviale de fond de vallée, en liaison hydraulique ou non avec un cours d'eau, et dont l'écoulement a une composante horizontale principale (G.Castany.1982).

La nappe d'inféro-flux d'Outoul amont est contenue dans des alluvions, constituées essentiellement de sables fins à grossiers et son substratum est continué par des terrains cristallins du socle précambrien.

C'est une nappe libre, dont l'alimentation est liée aux crues de l'oued.

#### IV.6. Condition d'écoulement

L'écoulement générale de l'oued Outoul s'effectue dans une direction NE-SW, les fortes pentes du bassin versant conduisent à une réponse rapide de l'écoulement de l'oued.

Les évolutions des débits inféroflux ont été effectuées par plusieurs missions sur l'oued Outoul, et ont donné les résultats suivants ( Boukhallat.S et Bendjaballah.M,1990) :

$Q=361/s$  Sofrenten (1961) ;

$Q=321/s$  pour l'Année étude (1968) ;

$Q= 201/s$  En INRH(1987) ;

Où  $Q$  :représente le débit de l'oued.

#### IV.7. Définition de la nappe

La nappe des alluvions est considérée libre, le milieu physique étudié est de type poreux, continu.

La surface libre de la nappe est dans l'ensemble peu profonde, 1.70m à 3.2m par rapport au sol. Elle est plus profonde à l'amont qu'à l'aval. L'épaisseur saturée de l'aquifère est d'environ 10m au maximum dans la cuvette.

L'alimentation de la nappe s'effectue par les modes suivants :

- ❖ Précipitations directes sur la surface de cuvette ;
- ❖ L'infiltration des crues ;
- ❖ L'infiltration par les bordures de cuvette ;
- ❖ Les apports probables des fissures( réalimentation profonde) de la bordure supérieure de la cuvette .

#### IV.8. Identification du réservoir

Les lithologies rencontrées donnent au réservoir un caractère multicouches où les niveaux sont à perméabilité différente. Dans la cuvette se manifeste une discontinuité horizontale des strates.

Verticalement, la variation des faciès lithologiques est rapide donnant ainsi une superposition de « couches » plus ou moins aquifères.

Cette hétérogénéité montre dans deux directions toute l'irrégularité de la stratification.

Compte tenu de ces observations, on peut d'une manière simplifiée distinguer qualitativement les niveaux suivants :

- ❖ Les sables, moyen, grossier, à très grossier, avec galets et graviers en association sont très perméables de l'ordre  $10^{-3}$  m/s ;
- ❖ Les strates sableuses (moyen à grossier) peu limoneuses (lits interstratifiés) sont perméables ;
- ❖ Les niveaux franchement limono-sableux ou limono-sablo-argileux seraient peu perméables.

Les observations de terrain et les sondages ont permis de dresser les limites naturelles du réservoir où :

- ❖ Latéralement, l'aquifère est limité par les rives granitiques étanches ;
- ❖ En profondeur, le mur de l'aquifère est le substratum sain continu tout au long de la cuvette et d'une rive à l'autre sous les alluvions ;
- ❖ La limite supérieure de la cuvette correspond au relèvement en relief, à l'amont, de ce substratum.

#### IV.9. Hydrodynamisme souterrain

La nappe s'écoule dans une direction générale confondue avec celle de l'oued, et imposée par la configuration souterraine du substratum.

Cette nappe alluviale se trouverait en continuité hydraulique avec les eaux circulantes à travers la fissuration du substratum altéré.

#### IV.10. Conclusion

L'écoulement souterrain de l'oued Tamanrasset et de l'oued Outoul s'alimente en eau à partir de l'infiltration des eaux de pluies. Lors du passage d'une crue, une partie de celle-ci s'infiltre pour engendrer un inféro-flux tandis que l'autre partie de la crue s'évapore.

Cette eau est emmagasinée dans l'espace poreux des alluvions et dans les fissures de la roche qui sont très importantes.

## CHAPITRE V

### Apports des études géophysiques

#### V.1.Introduction

Pour une meilleure connaissance de notre terrain d'étude ,la compagnie générale de géophysique (C.G.G de 1969 à1972) a effectué une prospection géophysique.

Elle a mis en évidence , en particulier, les principaux chenaux qui drainent l'infero-flux de l'oued grâce à la combinaison des deux méthodes , sismique et électrique .

#### V.2.Aperçu sur les méthodes utilisées

##### V.2.1.Méthode électrique

La prospection par sondage électrique permet de mesurer la résistivité électrique des différentes couches du sous sol ainsi que leurs épaisseurs .

##### V.2.2. Méthode sismique

Cette méthode consiste à enregistrer les temps et les amplitudes sismiques à l'aide des géophones. En étudiant les paramètres obtenus (vitesse, épaisseurs), on arrive à déterminer la profondeur des discontinuités et leur nature.

#### V.3.Resultats des méthodes géophysiques

Après comparaison des valeurs obtenues par les méthodes géophysiques sur l'oued Tamanrasset et outoul , il apparaît, bien que celles qui définissent le même faciès pour le même résultat, dont nous présentons ci après un échantillon.

##### V.3.1.Résultats sismiques

Les différentes vitesses sismiques obtenues sont les suivantes :

- ❖ 0.6-0.9Km /s sable limoneux fin à moyen ;
- ❖ 0.8-0.9Km /s sable moyen à grossier graveleuse ;
- ❖ 1.7-2.1Km/s sable grossière légèrement limoneux ;
- ❖ 2.4Km/s substratum altéré.

##### V.3.2. Résultats électriques

L'analyse générale des résultats obtenus par sondages électriques, nous a permis d'établir une corrélations avec le log sondages mécaniques.

Les résistivité attribuées aux différentes formations sont les suivants :

- ❖ 25  $\Omega$  m à 80  $\Omega$  m \_ sable fin à moyen légèrement limoneux ;
- ❖ 120 à 160  $\Omega$  m \_ sable fin limoneux ;
- ❖ 180 à 250  $\Omega$  m \_ sable moyen à grossier ;
- ❖ 340 à 350  $\Omega$  m \_ sables grossiers (gravier et blocs) ;
- ❖ 20 à 75  $\Omega$  m \_ sables grossiers légèrement limoneux ;
- ❖ 250 à 850  $\Omega$  m \_ substratum altéré ;
- ❖  $\geq 1000$   $\Omega$  m \_ substratum sain.

#### **V.4. Interprétation quantitative : oued Tamanrasset ( figure 23)**

La C.G.G 1972 a établi des coupes géoelectrique en se basant sur les données de sondages électriques ,les sondages mécaniques et les profils sismiques ,ce qui a permis d'estimer la profondeur du toit du substratum ainsi que la nature de l'aquifère .

#### **V.5. Interprétation quantitatives : oued Outoul ( figure 24, 25)**

L'objectif recherché par l'étude géophysique dans l'oued outoul étant surtout orienté pour le choix des zones d'implantation supplémentaire destinées à augmenter l'approvisionnement eau de la ville de Tamanrasset.

Pour se faire , il est demandé aux méthodes utilisées ( électrique et sismique) de préciser le paléo relief du substratum rocheux imperméables et de déterminer l'aptitude du remplissage alluvionnaire à laisser filtrer les eaux souterraine.

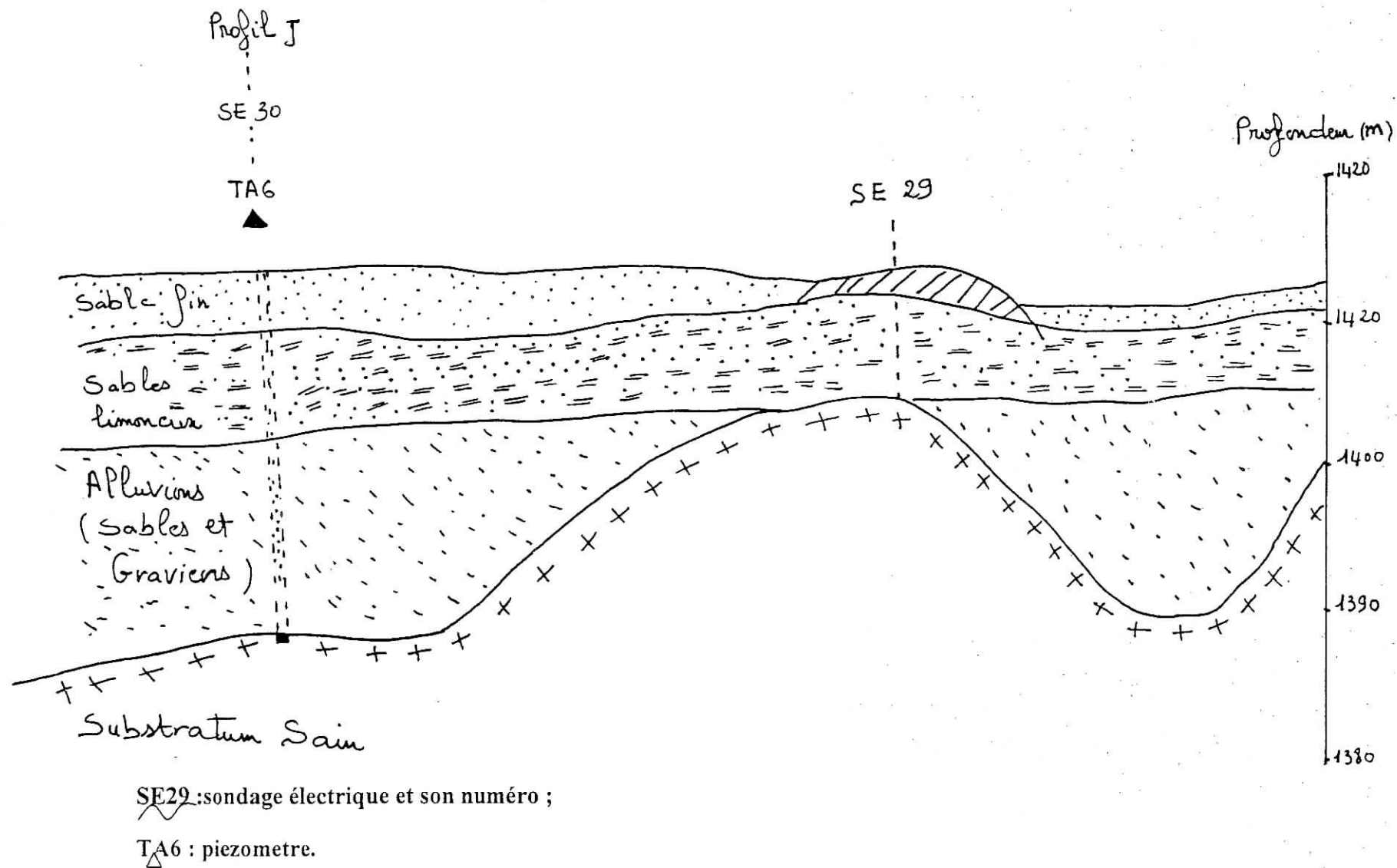
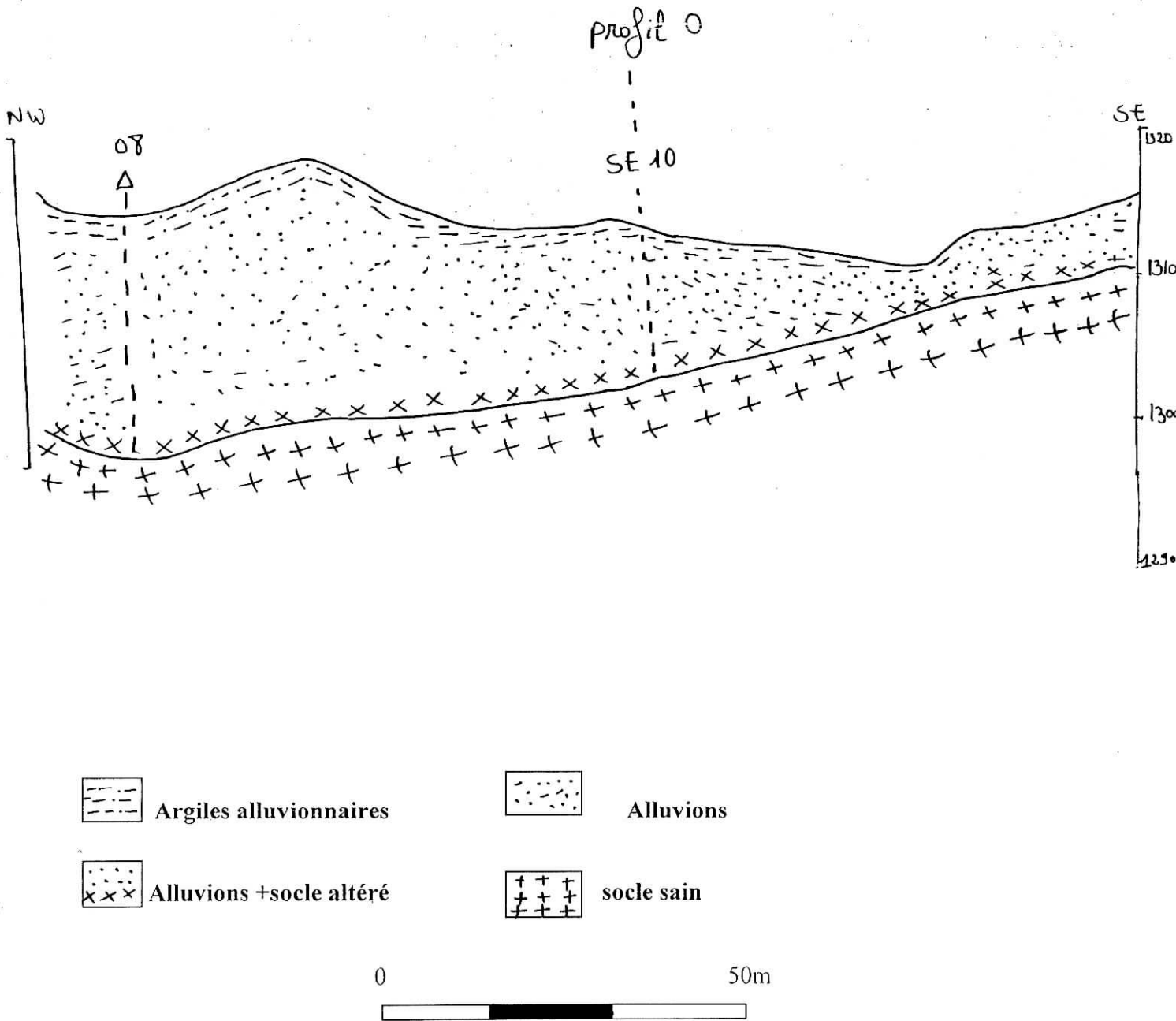


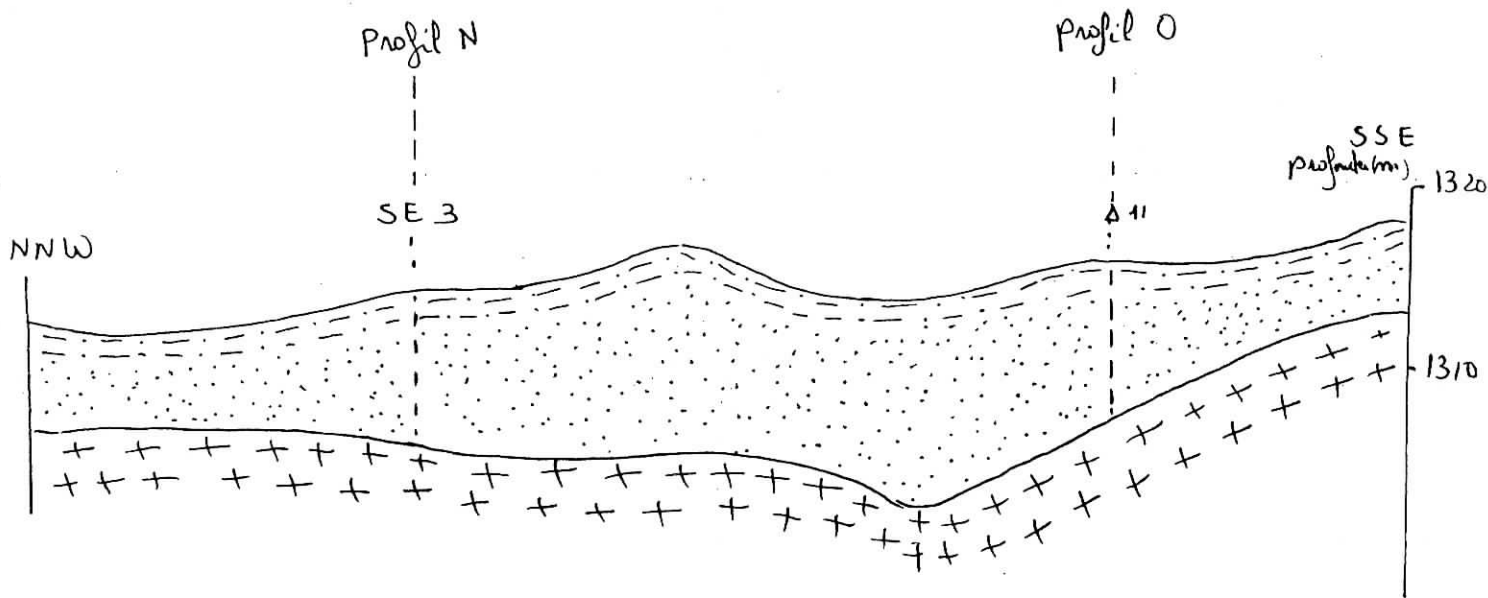
Figure 23 : coupe E géoelectrique de la nappe alluvial de l'oued Tamanrasset (C.G.G.1972)








**Figure 24: coupe géoelectrique de la nappe alluviale de l'oued outoul (C.G.G1972)**

**Coupe K**



### Légende

-  Argile alluvionnaire ,
-  Alluvions ;
-  Socle sain.



**Figure 25: Coupe géoelectrique de la nappe alluviale de l'oued Outoul (C.G.G 1972)**

**Coupe M**

## V.6. Commentaire

Toute fois, il n'a pas été possible de distinguer les alluvions humides du socle altéré humide.

L'épaisseur de cette tranche aquifère ne dépasse pas 20m en amont alors que dans la zone avale, l'épaisseur est comprise entre 25 à 30m. Cette tranche aquifère à une résistivité comprise entre 10 et 70 ohmm. Ces basses résistivité sont dues à l'importance des niveaux argileux que comportent les alluvions, mais probablement aussi aux teneurs en sels magnésiens des eaux. On ne peut donc conclure, la perméabilité des alluvions sans essais de débit et mesures de résistivité des eaux.

## V.7. Conclusion

La prospection géophysique par méthode électrique et sismique effectuées dans les vallées de l'oued Tamanrasset et d'Outoul a permis de déterminer l'allure du substratum imperméable et l'épaisseur de la tranche aquifère.

## Chapitre VI : Présentations des logiciels

### VI.1.Introduction

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 (histogramme, variance ,écart-type )le variogramme, la validation des résultats et le krigeage ;la cartographie est réalisée à l'aide du logiciel WINSURF.

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

Geostatistical Environmental Assessment Software		
DATA PREP	PREVAR	CONREC
TRANS	VARIO	XYGRAPH
		POST POLT
STAT1	XVALID	HPPLOT
SCATTER	KRIGE	VIEW

### VI.2.Description des logiciels

L'analyse géostatistique des épaisseurs des alluvions au niveau d'oued Tamanrasset et de l'oued Outoul a été réalisée par le logiciel (GEO-EAS).L'ajustement à la loi normale est obtenu par le logiciel HYDROLAB .Le s cartes sont réalisées par le logiciel WINSURF. Ces logiciels sont décrits dans des travaux déjà réalisées au niveau du département de génie hydraulique :(ABDOU.A et HAMIDI.M 1997,AMIRI.B et IDER.K 1998, BAALIL 2001, BOUCHAALA.F 2001).

# TROISIEME PARTIE

Application aux réservoirs hydrogéologiques et interprétations des résultats

## 3<sup>ème</sup> partie

### introduction

L'interprétation des résultats portera sur l'utilisation de la statistique élémentaire, la modélisation géostatistique et finalement par la cartographie automatique de la variable étudiée.

## Chapitre VII

### Analyse statistique des données

#### VII.1. Introduction:

L'analyse statistique des données, nous permet de faire une critique et mieux interpréter les résultats obtenus expérimentalement. Elle nous renseigne sur les moyennes, les écarts et leur adéquation.

#### VII.2. Acquisition et critique des données:

##### VII.2.1. L'épaisseur

Dans notre étude, nous avons analysé les épaisseurs du remplissage alluvionnaire. Nous avons prélevé 145 points de mesure pour l'oued Tamanrasset et 43 points de mesures pour l'oued Outoul. Ces derniers proviennent des sondages géoelectriques effectués par la compagnie géophysique générale (C.G.G en 1972)

Ces points sont répartie d'une façon aléatoire sur toute les vallées de l'oued de Tamanrasset et d'Outoul fig.26et27.

### VII.2.2 Critique

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

- ❖ La possibilité que certains forages n'ont pas pu atteindre la formation du substratum imperméable ;
- ❖ On peut rencontrer des formations argileuses dans le remplissage alluvionnaire ,c'est à dire la possibilité de l'existence des couches imperméables.

### VII.2.3.Répartitions des points de mesure

La Distribution spatiale de la répartition des données se fait comme suit :

- La distribution spatial points de mesure( oued Tamanrasset) : Ces points sont répartis d'une façon aléatoire sur tout le lit de l'oued Tamanrasset (figure 26).
- Plusieurs points sont localisés à l'amont de l'oued où se trouve le champs de captage des eaux souterrains .
- La répartition des données se fait selon duex axes le premier axe, orienté Nord Sud et un second axe orient Nord Est –Sud Ouest.
- La Distribution spatiale des points de mesures (oued Outoul ) :Ces points sont répartis de même façon sur tout le lit de l'oued Outoul (figure27).

### VII.3. Examen des paramètres statistiques élémentaires:

Cet examen est nécessaire afin d'avoir les paramètres statistiques de l'échantillon. Il existe trois catégories de paramètres:

- 1.Paramètre de position;
- 2.Paramètre de dispersion;

3. Paramètre de forme.

### VII.3.1. Paramètres de position:

#### VII.3.1.1. la moyenne arithmétique:

Il s'agit du rapport entre la somme des valeurs correspondant aux différents éléments d'une série et le nombre des éléments de cette série.

$X_i$ : Valeur de l'observation  $i$ ;

$n$ : Taille de l'échantillon.

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i$$

**VII.3.1.2. Le mode** : C'est la valeur du caractère ayant la fréquence maximale.

#### VII.3.1.3. La médiane:

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

### VII.3.2 Paramètres de dispersion

Il permet de chiffrer la variabilité des valeurs observées autour du paramètre de position, ce sont:

#### VII.3.2.1. L'étendue:

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

$$W = X_{\max} - X_{\min}$$

#### VII.3.2.2. La variance:

Elle est donnée par la formule suivante:

$$\sigma^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2$$



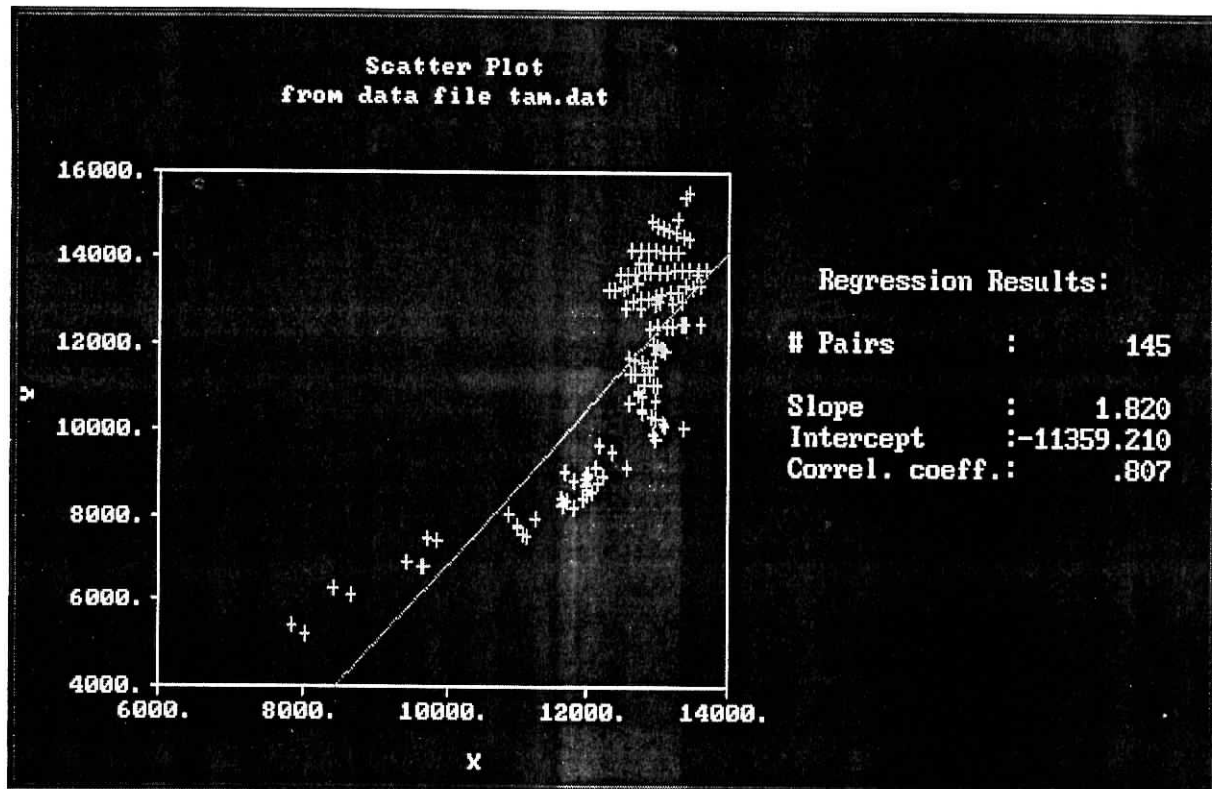


Figure 26: Distribution spatiale des points de mesure ( $e_1$ )  
oued Tamanrasset

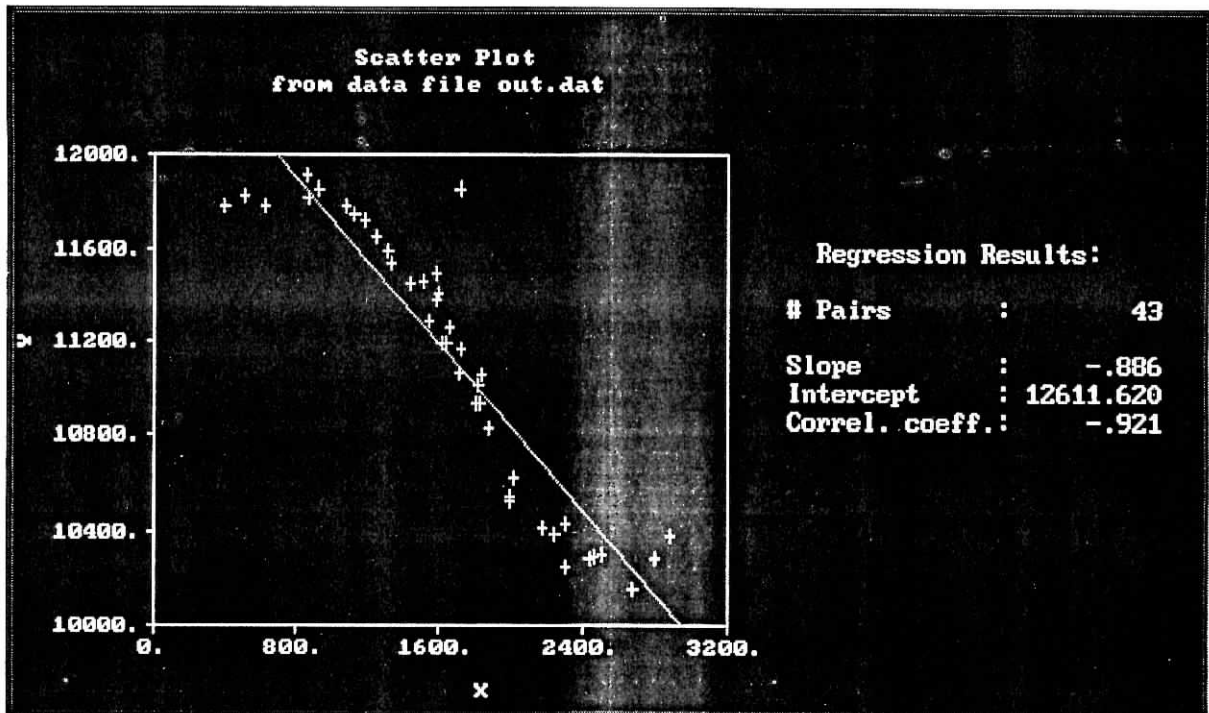


Figure 27: Distribution spatiale des données de mesures( $e_{\text{out}}$ ) oued Outoul

**VII.3.2.3.L'écart type:**

Désigné par  $\sigma$  est donné comme suit:

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

**VII.3.2.3.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.

$$C_v = \frac{\sigma}{|\bar{x}|}$$

**VII.3.3. paramètre de forme:**

Ce paramètre sert à définir l'allure générale d'une distribution

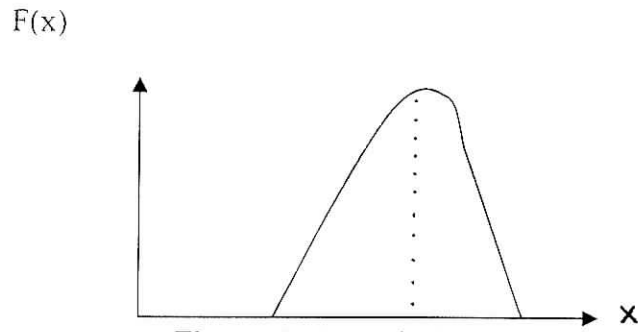
Ils existent deux paramètres de forme:

**VII.3.3.1 Coefficient d'asymétrie Skewness:**

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

❖ Si Skewness < 0 : c'est l'asymétrie négative et la courbe sera décalée vers la gauche  
figure A

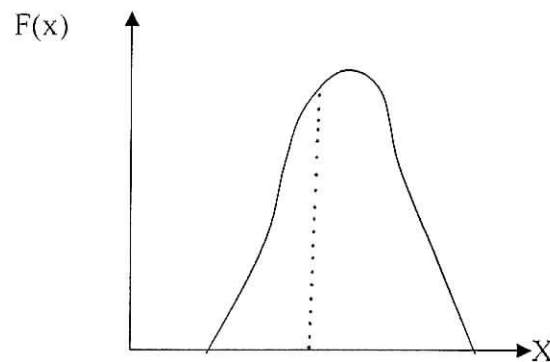
$$\text{Skewness} = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^3}{\sigma^3}$$



**Figure A : Asymétrie négative**

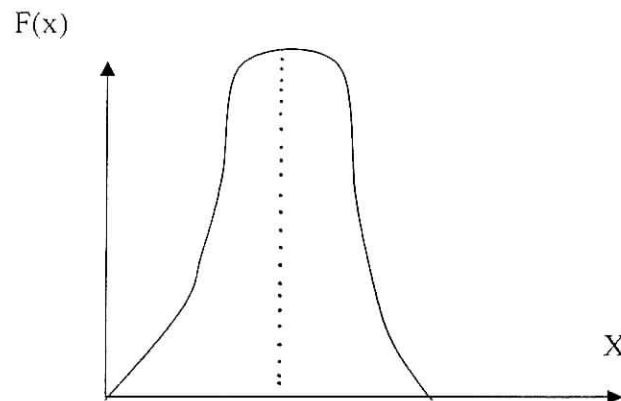
(Skewness  $< 0$ )

- ❖ Si Skewness  $> 0$ : nous sommes dans le cas d'asymétrie positive et notre courbe sera décalée vers la droite (figure B)



**Figure B : asymétrie positive (Skewness  $> 0$ )**

- ❖ Si Skewness  $= 0$ : nous sommes dans le cas de l'asymétrie nulle c'est à dire que notre courbe est symétrique (figure ,C) :



**Figure C : Asymétrie nulle (Skewness  $= 0$ )**

### VII.3.3.2. Coefficient d'aplatissement(Kurtosis)

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

$$\text{Kurtosis} = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^4}{\sigma^4} - 3$$

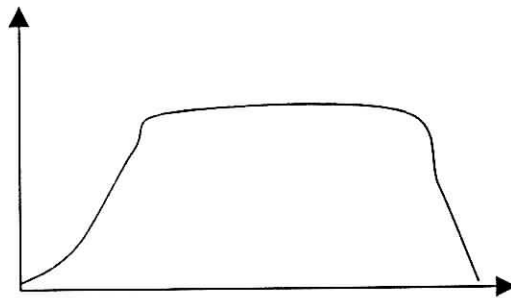


Figure D : concentration faible

f(x) (Kurtosis < 0)

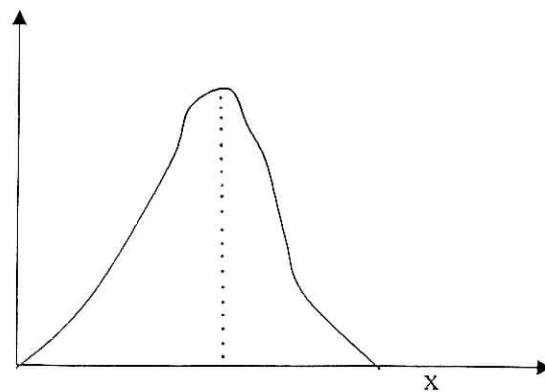


Figure E : concentration normale (Kurtosis=0)

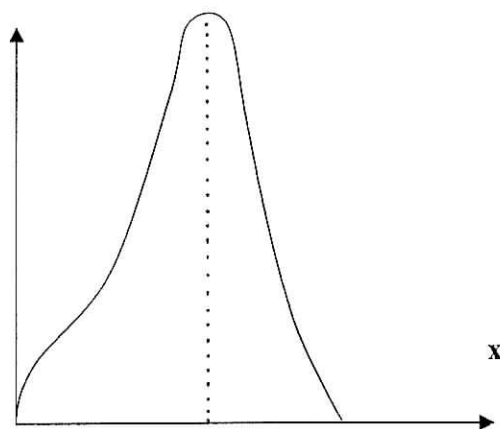
$F(x)$ 

Figure F : forte concentration

( Kurtosis  $> 0$  )

#### VII.4. Ajustement aux lois de probabilités

L'ajustement a pour objectif principal de vérifier qu'un échantillon provient ou non d'une variable de distribution connue. En géostatistique la connaissance de la loi de distribution des paramètres est indispensable.

Signalons toutefois que dans ce domaine les lois normale et log normale sont souvent traitées.

Les paramètres structuraux des nappes telle que l'épaisseur suit une loi normale.

### VII.5. Paramètres statistiques élémentaires des données

Les différentes caractéristiques des paramètres statistiques des épaisseurs sont obtenus par le logiciel GEO-EAS et sont résumées dans le tableau 1 :

**Tableau 1 : paramètres statistiques élémentaires des épaisseurs**

Paramètres	Épaisseur ( $e_1$ )m Oued Tamanrasset	Épaisseur( $e_2$ )m Oued Outoul
Taille	145	43
Min	2.00	3.20
Max	43.40	24.00
Moyenne	19.75	13.52
Médiane	18.8	14
Étendue	41.40	20.80
Variance	68.87	26.94
Ecart type	8.30	5.19
Coef de variation (CV en%)	41.82	38.40
Skewness	0.19	-0.11
Kurtosis	2.51	2.23
1 <sup>ère</sup> Quantile	13.00	9.35
3 <sup>ème</sup> Quantile	25.15	16.82

## VII.6. Interprétation

L'interprétation des résultats a permis de faire les observations suivantes :

**Taille :** le nombre des données d'oued Tamanrasset est plus grand que l'oued Outoul ;

**Min :** l'épaisseur minimale de l'oued Tamanrasset est de 2m par contre l'épaisseur de l'oued Outoul est de 3.2m ;

**Max :** l'épaisseur maximale de l'oued Tamanrasset est plus grande que l'épaisseur de l'oued Outoul ;

**Moyenne :** la valeur moyenne ( $e_1$ ) est plus grande que la valeur de ( $e_2$ ) ;

**Médiane :** la valeur de l'oued Tamanrasset est supérieure à celle de l'oued Outoul ;

**Etendue :** c'est la différence entre la plus grande et la plus petite réalisation de la distribution  $e_1$  supérieure à  $e_2$  (fig. 28 et 29) ;

**Variance :** la variance de l'épaisseur  $e_1$  est plus grande que la variance de  $e_2$  ;

**Ecart-type :** la dispersion caractérisé par un écart type très élevée, témoigne de l'hétérogénéité spatiale des données expérimentales (fig. 28 et 29) ;

**Coefficient de variation :** nous remarquons que le coefficient de variation ne dépasse pas 50% pour  $e_1$  et  $e_2$  alors la loi de distribution de l'épaisseur est normale (fig. 30 et 31) ;

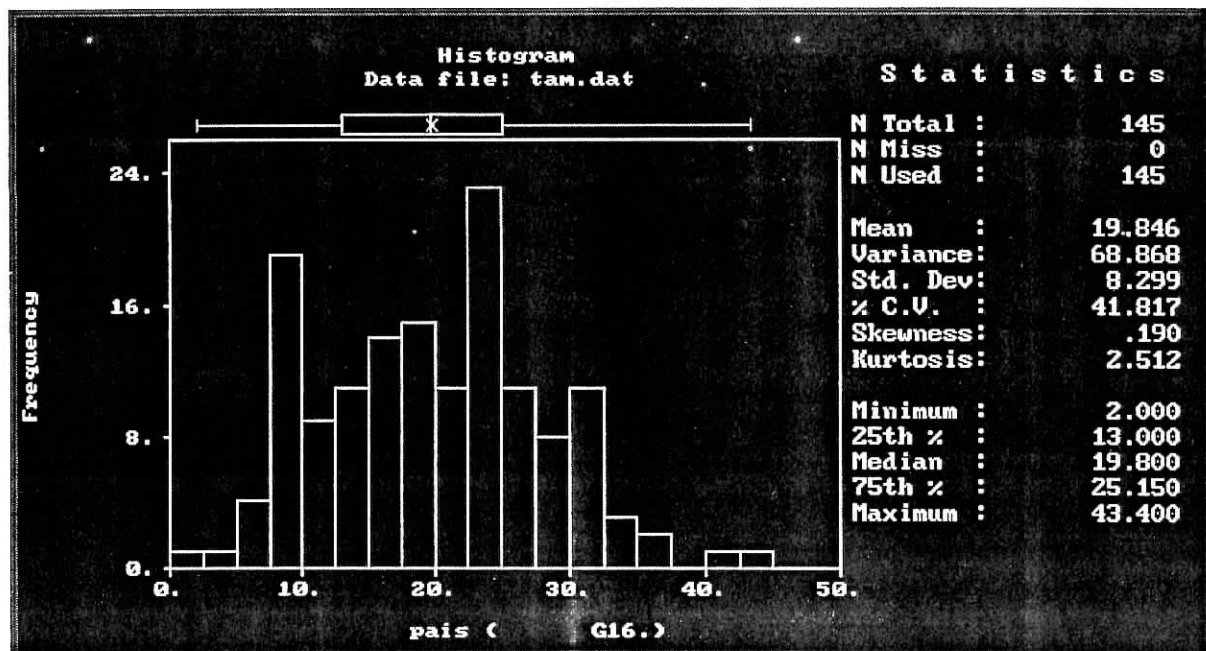
**Le coefficient d'asymétrie (Skewness) :** est positif pour l'épaisseur ( $e_1$ ) ce qui indique que les dispersions sont étirées vers la droite, cela est confirmé par la forme des histogramme (fig. 28 et 29), et négatif pour l'épaisseur ( $e_2$ ) ce qui indique que la courbe sera décalée vers la gauche (fig. 31), et les Skewness des  $e_1$  et  $e_2$  sont faibles et se rapprochent de zéro ce qui montre que la distribution est sensiblement symétrique ;

**Le coefficient d'aplatissement (Kurtosis) :** est positif, ce qui traduit une forte concentration des données ;

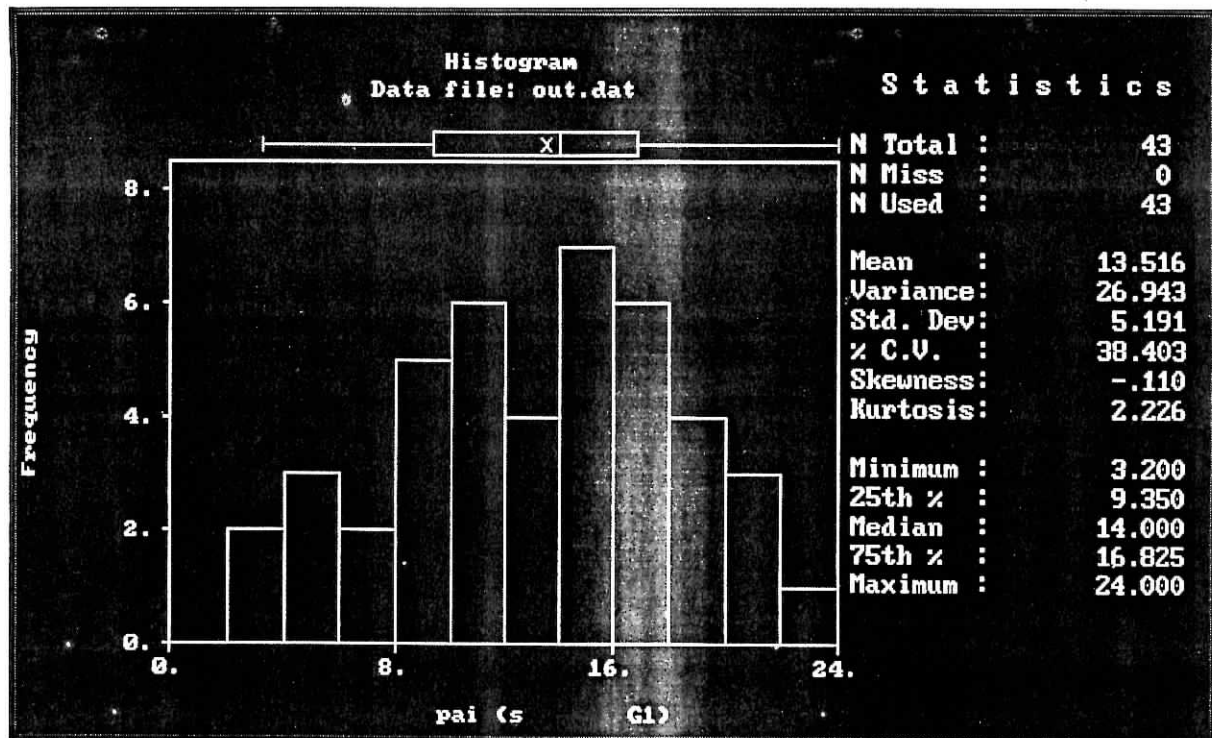
**1<sup>ère</sup> quantile :** les valeurs du 1<sup>ère</sup> quantile indiquent que 25% des valeurs des échantillons sont inférieure à 13m pour ( $e_1$ ) et 9.35m pour ( $e_2$ ) ;

**3<sup>ème</sup> quantile :** les valeurs du 3<sup>ème</sup> quantile indiquent que 75% des valeurs des échantillons sont inférieures à 25.150m pour ( $e_1$ ) et 16.82 pour ( $e_2$ ).





**Figure28 :Histogramme des épaisseur,  
(oued Tamanrasset )**



**Figure29 : Histogramme des épaisseur  $e_2$**   
**( oued Outoul)**

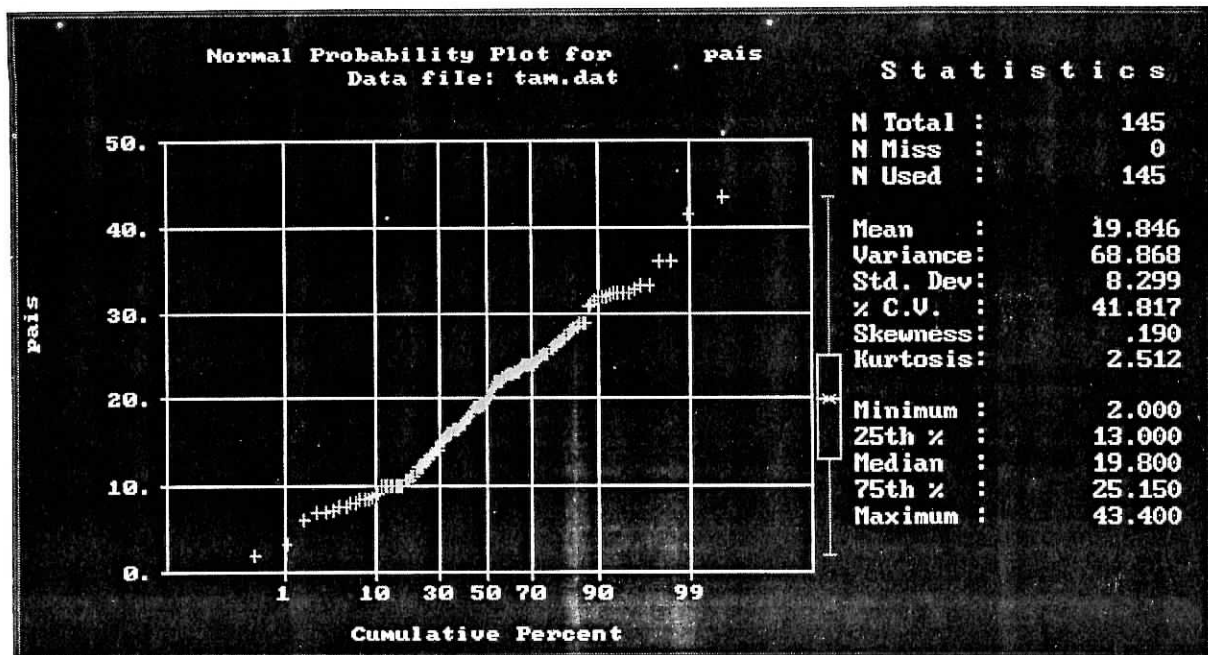


Figure 30 : Diagramme d'ajustement des épaisseurs( oued Tamanrasset)

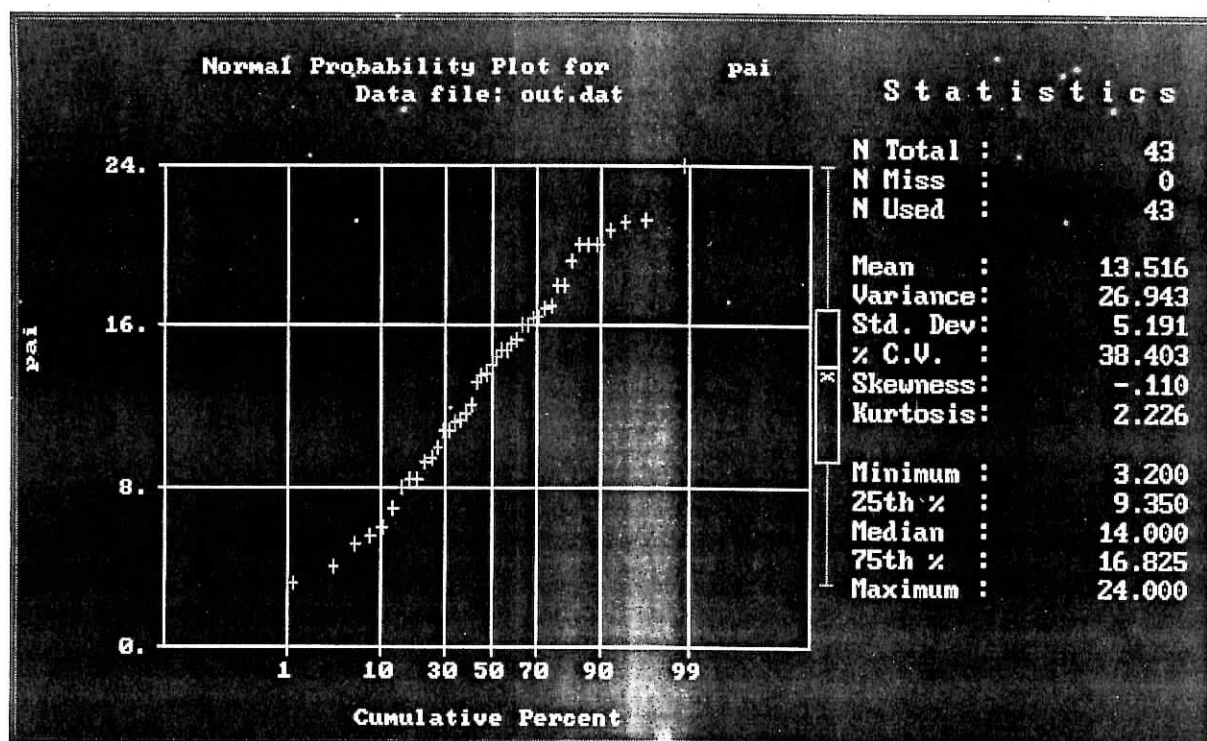


Figure 31: Diagramme d'ajustement des épaisseurs  
( oued Outoul)

# Chapitre VIII

## Interprétations des résultats

### VIII.1. INTRODUCTION

L'analyse géostatistique des épaisseurs (e) des aquifères alluvionnaires de l'oued Tamanrasset et l'Outoul ont été réalisées par le logiciel GEO-EAS et logiciel WINSURF.

Ces logiciels sont bien décrits dans les thèses d'ingénieur réalisées par Amiri et Ider (1998) ,Baali(2001).

L'objectif est de déterminer la structure de la variabilité qui fera l'objet d'une cartographie automatique.

### VIII.2. Prévariogramme

La construction des couples est réalisée par ce programme. Il donne les classes et la distance moyenne. Le fichier de sortie a une extension PCF (pair comparaison file).

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

Pour l'épaisseur de l' oued Tamanrasset, on a trouvé 9566 couples et pour l'épaisseur de l'oued Outoul 832 couples .

### VIII.3. Construction du variogramme

En utilisant les coordonnées Lambert , (longitude x en m et latitude y en m), le prévariogramme établit le fichier PCF qui est nécessaire pour construire le variogramme correspondant. Ce même fichier PCF va être utilisé par l'option VARIO , pour la construction du variogramme .

En fonction de la distance , le calcul du variogramme se fait par classe renfermant un certain nombre de couples .

Le calcul du variogramme est considéré rigoureux généralement pour une classe possédant plus de 50 couples ( Azouz 1993 in Ider 1998).

### VIII.3.1. Variogramme de l'épaisseur de l'oued Tamanrasset

Le variogramme expérimental a été calculé sur la base des données brutes de l'épaisseur (e) .

En choisissant un pas (h) de 600m et une distance de 6000m correspondant à la demi distance séparent les points les plus éloignés, Nous obtenons 13 classes ( tableau 2) et 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  $\gamma(h)$ .

Tableau 2 : Résultats du variogramme de l'épaisseur de l'oued Tamanrasset :

Nombre de classe	Nombre de couples	Distance moyenne	$\gamma_1(h)$
1	829	288	47.85
2	1366	739.76	76.59
3	1112	1243.56	74.54
4	977	1744.281	67.82
5	784	2257.24	75.97
6	726	2744.21	64.34
7	652	3233.58	54.73
8	594	3752.11	75.03
9	639	4255.10	56.91
10	607	4753.94	69.52
11	528	5246.29	79.35
12	428	5729.12	64.45
13	324	6227.47	68.58

### VIII.3.2. Variogramme de l'épaisseur de l'oued Outoul

Le mode de construction du variogramme est le même, on a utilisé un pas de 500m et une distance de 1700m, il en résulte 4 classes ( tableau 3) :

Tableau 3 : Résultat du variogramme de l'épaisseur de l'oued Outoul

Nombre de classe	Nombre de couples	Distance moyenne	$\gamma_2(h)$
1	253	270.18	15.45
2	260	740.30	28.55
3	201	1238.68	34.56
4	118	1731.82	39.65

### VIII.4. Modélisation du variogramme

Après avoir construit le variogramme, il faut l'ajuster à l'un des modèles théoriques, avec l'utilisation des paramètres de ce modèle ( palier, pépité et portée ). Ce modèle serait rejeté ou accepté selon les résultats de l' Xvalid .

Pour l'épaisseur de l'oued Tamanrasset, nous constatons que le modèle le mieux adapté est le modèle exponentiel avec un effet pépité de 40 m<sup>2</sup>, une portée de 3000 m et un palier de 35m.

Pour l'épaisseur de l'oued Outoul nous avons adapté au modèle sphérique avec un palier 9m, une pépité de 1800m<sup>2</sup> et une portée de 30 m (tableau 4).

Les variogrammes des deux variables  $e_1$  et  $e_2$  sont représentés à la figure 32 et figure 33

Tableau 4 : paramètre des variogrammes

L'épaisseur( e)	Type	Pépité (m <sup>2</sup> )	Portée(m)	Palier (m)
Oued Tamanrasset	Exponentiel	40	3000	35
Oued Outoul	Sphérique	9	1800	30

## VIII.5. Validation du variogramme

Après plusieurs tentatives, en faisant varier les paramètres du modèle (pépite et palier), un certain nombre d'ajustements sera déterminé visuellement. La décision d'accepter définitivement un modèle ne peut se faire qu'après validation par l'option : XVALID.

Donc XVALID est une option du programme GEO-EAS qui permet le test de validation croisée du modèle. On choisit une estimation par le krigeage des valeurs mesurées par le test des 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 :

$$m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (z_i - z_i^*) \rightarrow 0$$

- ❖ La moyenne quadratique des écarts réduits doit tendre vers l'unité pour vérifier que les erreurs de Krigeage sont cohérentes avec la variance calculée (tableau 5) :

$$g = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left[ \frac{z_i - z_i^*}{k} \right]^2 \rightarrow 1$$

Tableau 5 : résultats de l'option X VALID

Variable	Moyenne des écarts	Moyenne quadratiques des écarts
Epaisseur ( e <sub>1</sub> )	0.053	0.995
Epaisseur	-0.008	0.998

### Remarque :

Les résultats de tableau n°5 sont très proches aux normes préconisées pour le krigeage et plus de la validation. L'X VALID en consiste l'ajuster à un modèle théorique.



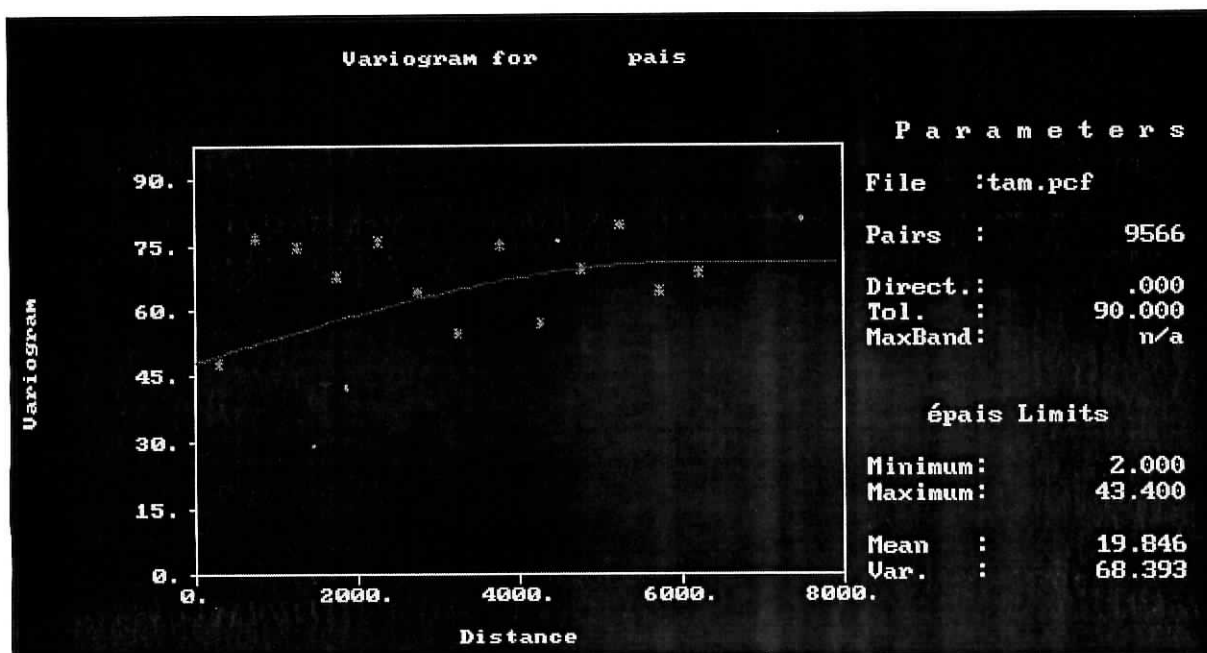
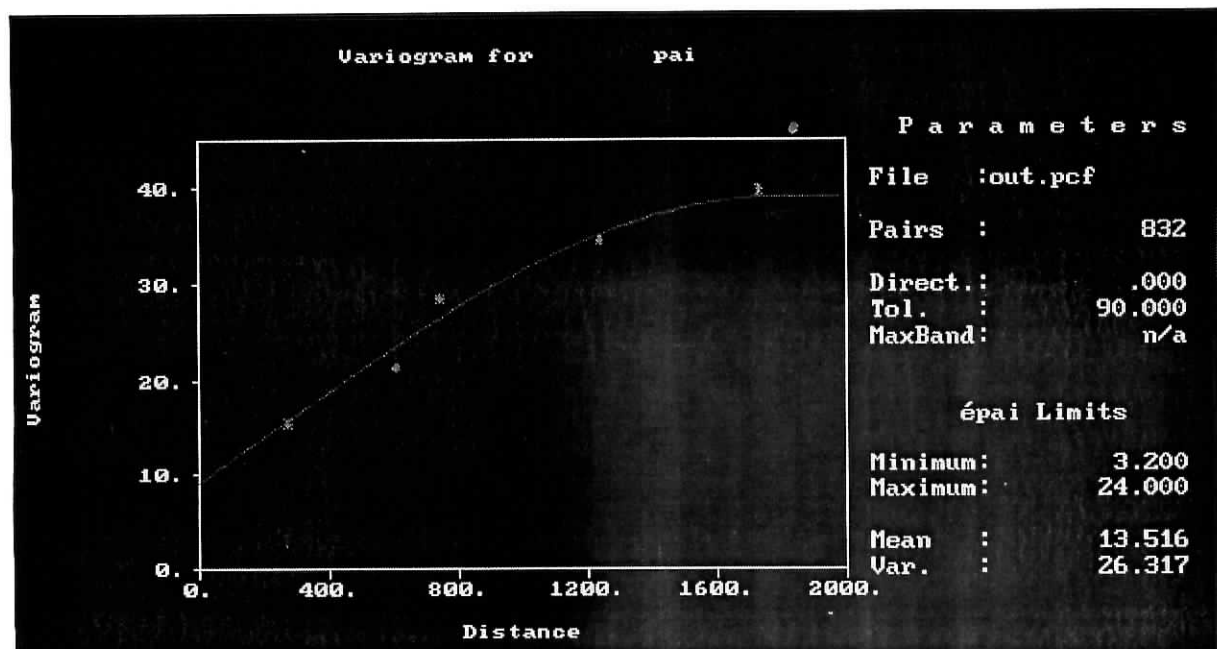


Figure 32 : Variogramme de l'épaisseur ( $e_1$ ) (Oued Tamanrasset)

Figure 33 : Variogramme de l'épaisseur ( $e_2$ ) (Oued Outoul)

## VIII.6. Interprétation des cartes krigées

### VIII.7.1. Carte krigée des épaisseurs ( $e_1$ ) de l'oued Tamanrasset

Nous remarquons d'après la carte krigée et le bloc diagramme des épaisseurs (fig. 34 et 35) trois zones bien distinctes. En effet, une première zone, située plus au nord est caractérisée par une importante épaisseur du remplissage alluvionnaire. Cette épaisseur atteint environ les 28 mètres, les courbes d'isovaleurs étant rapprochées cela indique une pente relativement élevée, de qui est largement visible au niveau du bloc diagramme. une seconde zone localisée au milieu du terrain étudié, montre une allure moins marquée avec des épaisseurs atteignant les 23m. Cette zone est moins importante par rapport à l'ensemble. Une troisième zone, localisée à l'aval de l'oued Tamanrasset (vers le sud) indique une profondeur maximal de 26m environ, avec des courbes à allure espacée ce qui dénote une faible pente du remplissage alluvionnaire.

### VIII.7.2. Carte krigée des épaisseur ( $e_2$ ) de l'oued Outoul

Cette carte a permis d'obtenir la profondeur du substratum granitique sain. Il faut noter que le socle présente sa grande profondeur dans sa partie nord, et se relève progressivement vers le sud dans sens de l'écoulement de l'oued (fig. 36 et 37).

L'épaisseur maximale de l'aquifère ou la profondeur maximale du substratum est de 19m. En rive droite, l'épaisseur est voisine de 7 à 9 m. Dans son ensemble, l'allure des courbes est espacée, le qui indique des épaisseur de remplissage graduelle. Néanmoins, on remarque une faible zone, localisée au niveau de la rive droite (vers le nord) où les courbes sont resserrées, la pente est relativement plus forte.

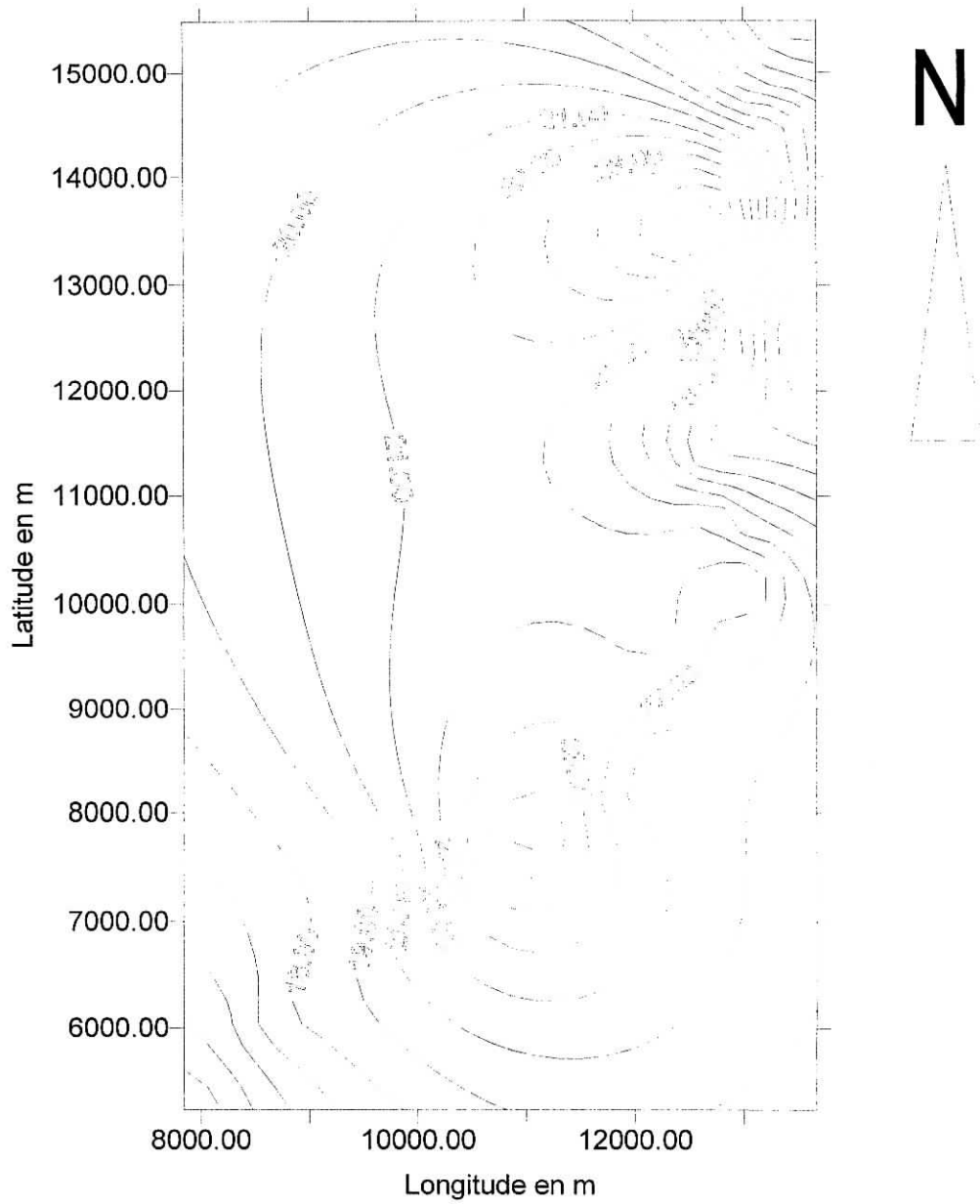
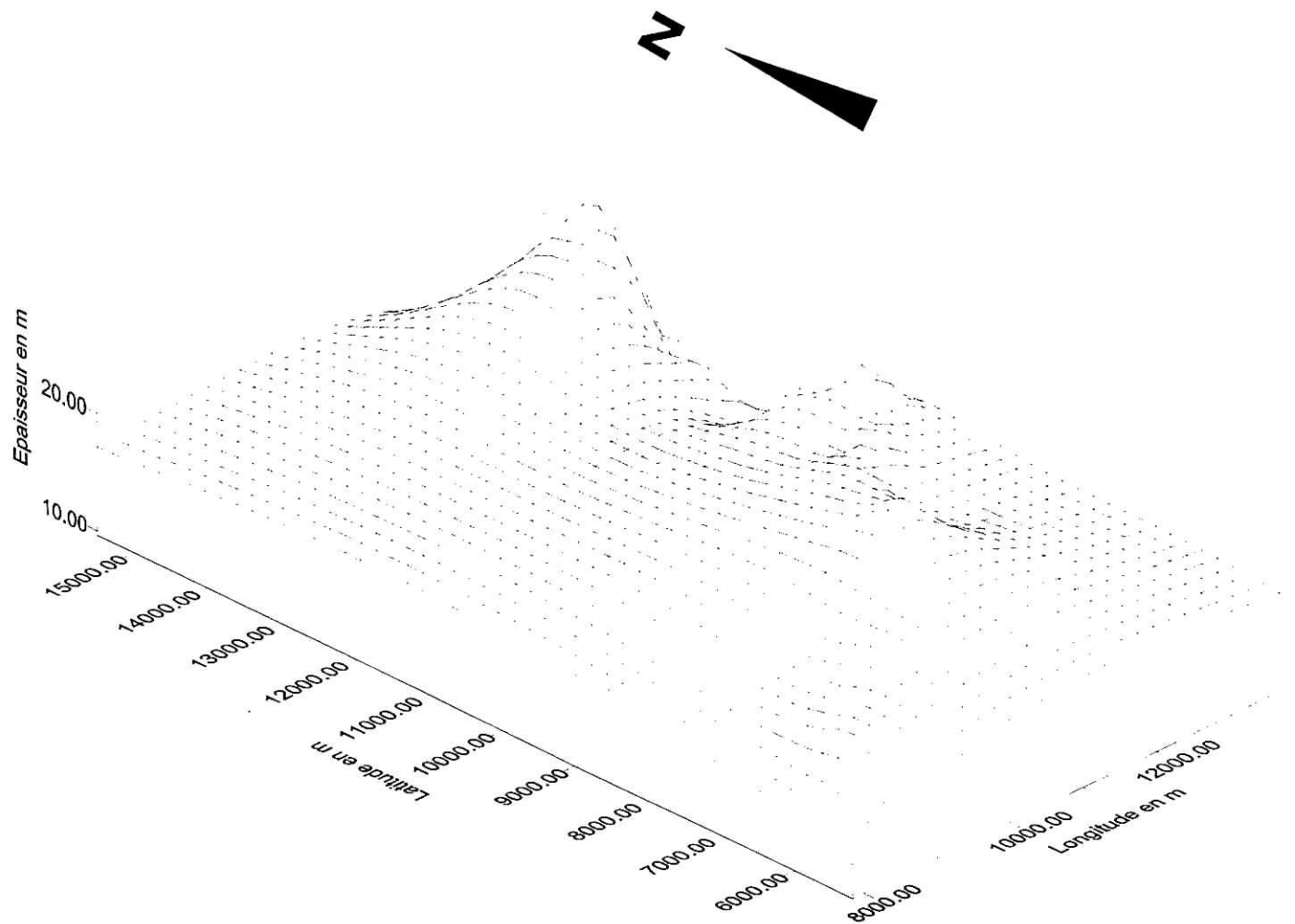


Figure 34: CARTE KRIGEE DES EPAISSEURS DU REMPLISSAGE ALLUVIONNAIRE DE L'OUED TAMANRASSET



**Figure .35 : bloc diagramme des épaisseurs de remplissage alluvionnaire de l'oued Tamarrasset**

N

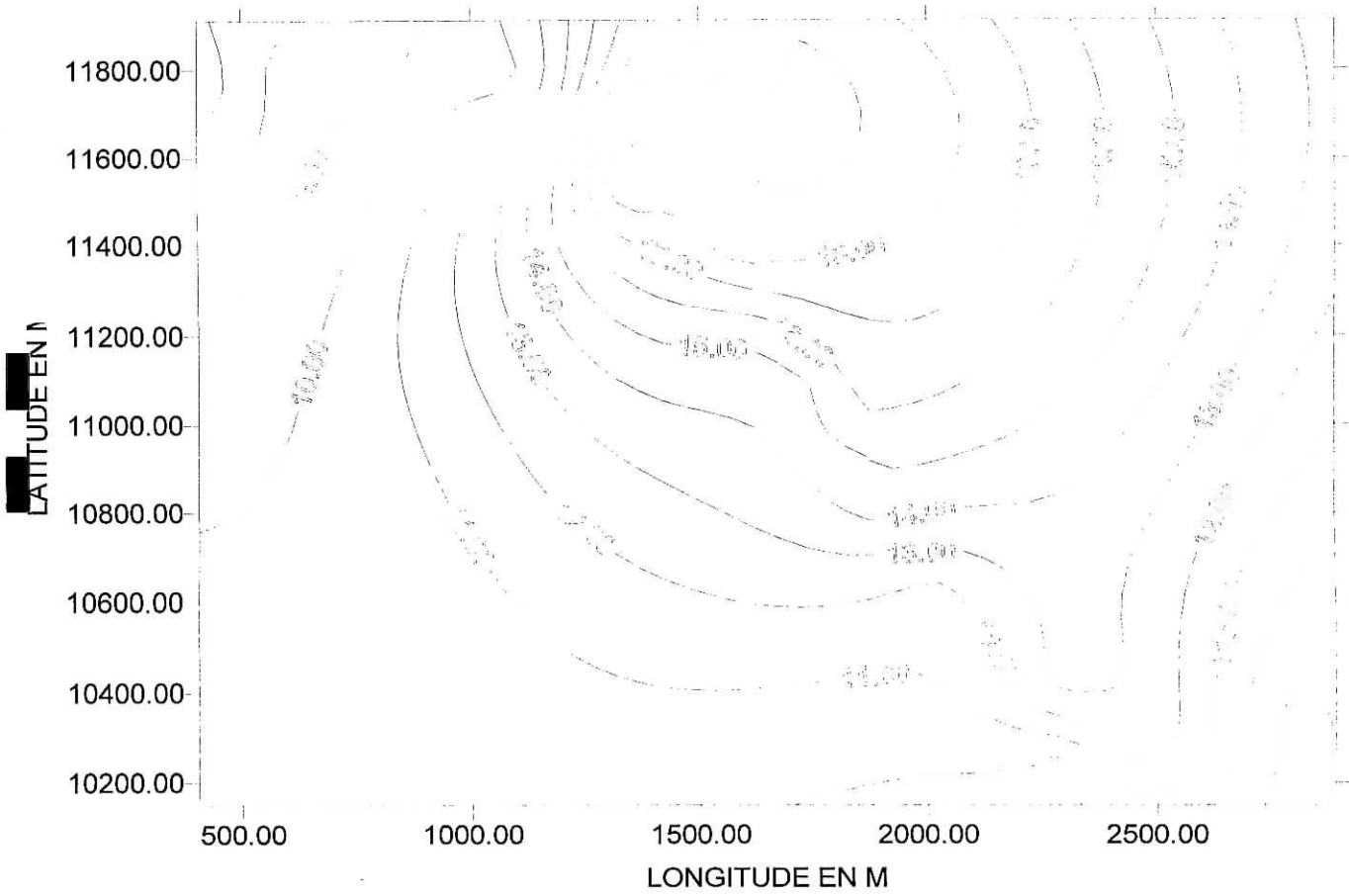


Figure 36 - CARTE KRIGEE DES EPAISSEURS DU REMPLISSAGE ALLUVIONNAIRE DE L'OUED OUTOUL

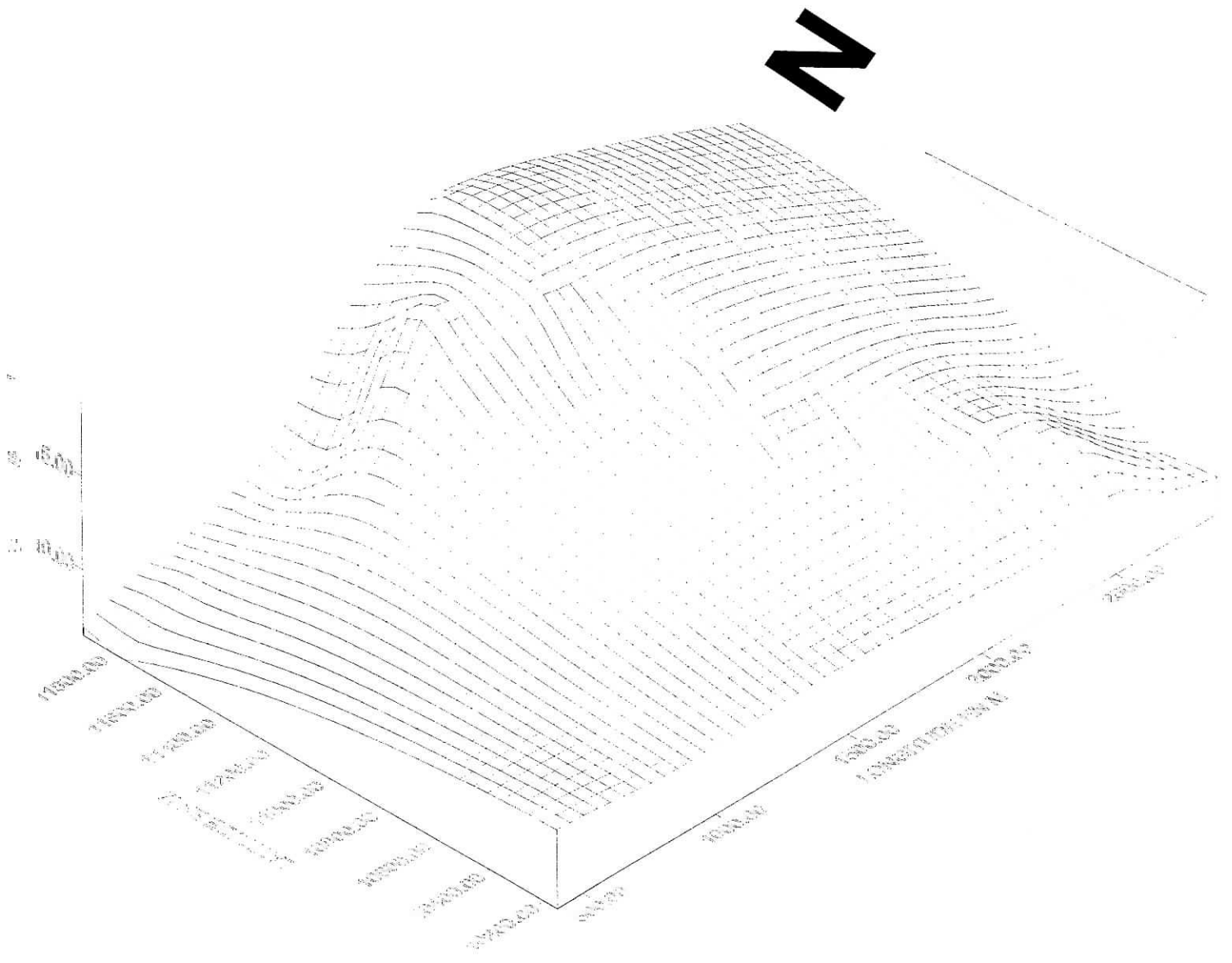


Figure 37 - BLOC DIAGRAMME DES EPAISSEURS DU REMPLISSAGE ALLUVIONNAIRE DE L'OUED OUTOUL

## VIII.8.CONCLUSION

Les analyses statistique et géostatistique des épaisseurs des remplissage alluvionnaires des réservoirs hydrologiques des oueds Tamanrasset et Outoul ont permis d'aboutir à la conclusion suivante :

- ❖ Les coefficients de variation étant inférieurs à 50%, montrent une variation plutôt régulière suivant probablement une loi normal ;
- ❖ Les résultats obtenus par XVALID sont conformes aux normes recommandées à savoir une moyenne qui tend vers 0 et une variance voisine de 1 ;
- ❖ Les cartes krigées obtenues grâce à la modélisation géostatistique indiquent plus où moins régulière du substratum. La carte krigée des épaisseur de l'oued Tamanrasset montre 3 zones distincts alors que celle d'Outoul indique une seule zone. Les épaisseurs sont variables, elle est maximum au niveau de l'oued Tamanrasset 28 m alors qu'elle est de 19 m pour oued Outoul L'allure des courbes est légèrement plus espacée pour la région d'outoul alors qu'il est resserrée dans la région de l'oued Tamanrasset. Ces allures sont en relation avec la géologie et la géomorphologie de ces régions.



# CONCLUSION GENERALE

## CONCLUSION GENERALE

La ville de Tamanrasset rencontre actuellement de grandes difficultés quant à la satisfaction des besoins en eau potable de la population, de la petite industrie et de l'irrigation. En effet, cette région est soumise d'une part à un régime climatique sévère, et d'autre part à une méconnaissance des potentialités en eau souterraine.

Les principales ressources en eau sont limitées principalement aux inféro-flux existants dans la région .

L'importance de ces ressources est liée d'une part à la géométrie de ces réservoirs c'est à dire au volume de roche aquifère et d'autre part au paramètre hydrodynamique matérialisé par le coefficient d'emmagasinement.

Dans cette optique, notre travail porte sur l'étude de la variabilité spatiale des épaisseurs du remplissage alluvionnaire au niveau des oueds de Tamanrasset et d'Outoul.

Pour cela, nous avons procédé à une analyse statistique détaillée avec une modélisation géostatistique. Cette étude, nous a permis d'aboutir aux conclusions suivantes :

- ❖ L'analyse statistique des épaisseurs a montré une distribution régulière s'ajustant à la loi normal ;
- ❖ Les variogrammes montrent un comportement non aléatoire, suivants des modèles du type exponentiel (O..Tamanrasset) et sphérique (O.Outoul) ;
- ❖ Grâce à la cartographie automatique, il a été mis en évidence des zones de remplissage alluvionnaire relativement importante qui sont probablement intéressantes à l'emmagasinement de l'eau.

Au terme de cette étude, il est souhaitable, que cette méthodologie d'approche soit réalisée au niveau d'autres inféro-flux du Hoggar. Il est également important de déterminer les paramètres hydrodynamiques de ces réservoirs hydrogéologiques en particulier le coefficient d'emmagasinement. Le volume de la roche et le coefficient d'emmagasinement sont les deux facteurs qui permettront d'évaluer quantitativement la ressource en eau souterraine.

# *BIBLIOGRAPHIE*

# Bibliographie

1. **ABDOU.A, HAMD.I.M** (1997) : Etude de la variabilité spatiale des paramètres hydrochimiques des eaux souterraines de la plaine de BENI SLIMANE. Projet de fin d'études, ENP.
2. **AMIRI.B, IDER.K** (1998) : Etude de la variabilité spatiale de la charge hydraulique de l'aquifère superficiel de la base SOUMMAM. Projet de fin d'études , ENP.
3. **BAALI.L** (2001) : Etude de variabilité spatiale des paramètres hydrogéochimiques par des méthodes d'approches géostatistique. Projet de fin d'études, ENP.
4. **BENDJABALLAH.M, BOUKHALLAT.S** (1990) : Application des méthodes géophysiques pour l'étude d'un barrage inferoflux sur Oued Outoul. Projet de fin d'études USTHB. USTHB.
5. **BENMALEK.M, KACEMI.A** (1993) : Etude hydrogéologique de l'inferoflux de la nappe alluviale (amont) de l'oued Outoul. Projet de fin d'études, USTHB
6. **BESBES.M, DJEDA.F** (1991) : Modèle de simulation hydrogéologique de la nappe de Tamanrasset, L'ANRH.
7. **BOISSONNAS.J** (1974) : Les granites à structures concentriques et quelques autres granites Tardi de la chaîne panfrican, tome 1.
8. **BOUCHALALA.F**.2001 :Variabilité spatiale des paramètres hydrogéologiques de la basse vallée de la Soummam, Projet de fin d'études ,ENP.
9. **BUREAU D'ETUDE** : dialog- hydro -géo service Etude géophysique de oued Tamanrasset.
10. **CASTANY.G** (1982) : Principes et méthode de l'hydrogéologie ED ,DUNOD, Paris ,236 p.
11. **C.G.G.** (1972) : Etude par prospection géophysique et forage de reconnaissances de l'inferoflux de l'Oued Tamanrasset, et Outoul. ANRH.

12. **CORNET.A** (1961) : Introduction à l'hydrogéologie saharienne – Rev.géog.Phys et Géol. vol 7. Fasc.1, Paris.
13. **ENHYD**, (1990) : Entreprise National des Etudes Hydrauliques «étude de faisabilité d'un barrage souterrain sur Oued Tamanrasset. ».
14. **ENGLUND.E, SPARKS.A** (1991) : GEO-EAS (Géostatistical Environmental Assessment Software), User's Guid U.S, Environmental protection Agency LAS VEGAS, NEVADA.
15. **KANTE.A** (1997) : Application de la méthode géostatistique à l'estimation des réserves géologiques. Projet de fin d'études , ENP.
16. **KERBOUA.L** (1997) : estimation et cartographie de l'évaporation réelle à partir d'images satellitales. NOAA-AVHRR cas de Tamanrasset. Projet de fin d'études, USTHB.
17. **KILIAN.C** (1932) ; Les conglomérats précambriens du Sahara central : le pharusien et le Suggarien. C.R.S.G.F. 87 P.
18. **LABORDE.J** (1997) hydrolab, logiciel CNRS.
19. **LELUBRE.M** (1952) : Recherche sur la géologie de L'AHAGGAR central et occidental. ONIG.Alger.
20. **LEVASSOR.A** (1971) Etude des ressources en eau de l'Oued Tamanrasset (bureau hydrogéologique DHW.Tamanrasset).
21. **MATHERON.G** (1965) :Les valeurs régionalisées et leurs estimation MASSIN, Paris, 305 p.
22. **SOLLAH.M** (1985) Etude hydrogéologique de l'Oued ABAËSSA (Tamanrasset). Projet de fin d'études , USTHB.
23. **SAIGHI.O** (1984) : Possibilités aquifères au HOGGAR central. Docteur de troisième cycle (USTHB).
24. **VITEL.G. M**(1974) :Stratigraphie du Hoggar central NANCY,P.388.
25. **WINSURF** (1994) : Logiciel de cartographie, surface. MAPPING System ver.501
26. **YAHIA.A** (1991) : Etude isostatique du HOGGAR. Projet de fin d'études, (USTHB).