

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE
DEPARTEMENT : GENIE HYDRAULIQUE



الدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
المصنفة - المصنفة
Ecole Nationale Polytechnique

PROJET DE FIN D'ETUDES

Thème

**VARIABILITE SPATIALE DES
PARAMETRES
HYDROGEOLOGIQUES DE LA
BASSE VALLEE DE LA
SOUMMAM**

Proposé par :

Mr. A.SEMMAR

Etudié par :

Mr. F.BOUCHAALA

Dirigé par :

Mr. A.SEMMAR

Promotion 2001

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

ملخص:

خلال هذا العمل حول الخصائص الهيدرو ديناميكية للجهة السفلى لمجرى الصومام، حاولنا إنشاء نموذج لتغير الوضائع باستخدام الطريقة الجيو إحصائية التي تعتمد على نظرية المتغيرات الجهوية. هذه الدراسة قد تحسن بأخذ بعين الاعتبار إزوتروبية وعدم تجانس المتشكل باستخدام بيانات المتغيرات ومحاولة إنشاء نموذج للانحراف عن طريق الدوال كثيرات الحدود.

Résumé :

Au cours de notre travail sur les caractéristiques hydrogéologiques de la basse vallée de la Soumnam nous avons essayer de modéliser la variabilité de ces paramètres et cartographier les grandeurs par la technique géostatistique basée sur la théorie des variables régionalisées.

Néanmoins cette étude peut être améliorée en tenant compte de l'anisotropie et l'hétérogénéité du problème en utilisant des variogrammes directionnels et en essayant de modéliser la dérive par des fonctions polynomiales.

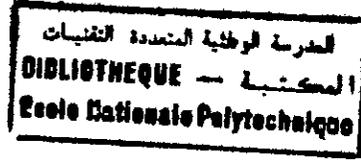
Abstract :

During our work on the hydrogeologic characteristic of the low River of the Soumnam we have try of modelise the variability of these parameters and make maps of sizes by the technical géostatique based on the theory of variable regionalized.

Nevertheless this survey can be improven while holding amount of the anistropie and the hétérogénéité of the problem while using of viogrammeses directionalets as trying modéliser drifts it by polynomial functions.

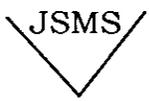
Les mots clés

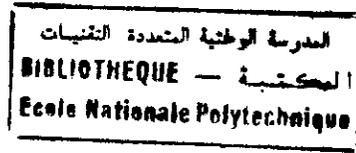
Hydrogéologie, perméabilité, l'épaisseur, géostatistique, variogramme, krigeage, statistique



DEDICACES

Je dédie ce modeste travail à :

- Mes parents surtout ma mère qui porte toutes les vertus de tendresse et sagesse, et qui m'a beaucoup aider pour devenir ce que je viens d'être.
- Mes frères en particulier Mohamed et Bilel.
- Mes sœurs, mes nièces et neveu (Ayoub, Hamza, Ibticeme, Mira).
- Tous mes amis (es).
- L'ensemble des dirigeants et fans de l'équipe de football, Jeunesse Sportive de Medinat Skikda ().



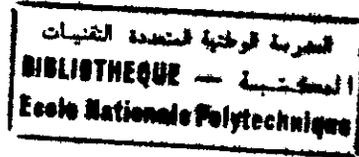
Remerciement

Je tiens à remercier, Tous ceux qui m'ont aider, de près ou de loin par leurs soutien moral et physique dans ces quelques lignes l'expression de notre gratitude et sincère remerciements.

Profonde reconnaissance à Mr. A.Semmar, qui n'a cessé de me prodiguer aides et conseils au long de ce travail et qui m'a bien voulu m'initier à cette technique.

Mes remerciements vont également aux enseignants qui ont contribué à notre formation et l'ensemble des enseignants membres de juré.

SOMMAIRE



Introduction générale

Première partie : Conception de l'approche géostatistique

Chapitre I : Méthodes d'estimation usuelles (non probabilistes)

| | |
|---|---|
| I.1. Introduction..... | 1 |
| I.2. Les méthodes d'interpolation..... | 1 |
| I.2.1. Méthode de triangulation..... | 1 |
| I.2.2. Méthode polynomiale..... | 1 |
| I.2.3. Méthode des moindres carrés..... | 2 |
| I.2.4. Méthode de pondération..... | 2 |
| I.3. Conclusion | 3 |

Chapitre II : Méthodes probabilistes

| | |
|---|----|
| II-1. Introduction..... | 4 |
| II-2. Définition..... | 4 |
| II-3. But de la géostatistique..... | 5 |
| II-4. Caractères généraux de la géostatistique..... | 5 |
| II-4-1. Variable régionalisée..... | 5 |
| II-5. Application..... | 5 |
| II-6. Notion des moments et hypothèses sur la fonction aléatoire..... | 6 |
| II-6.1. Les moments..... | 6 |
| II-6.2. Hypothèse sur la fonction aléatoire..... | 7 |
| II-7. Le variogramme..... | 9 |
| II-7.1. Définition..... | 9 |
| II-7.2. Estimation du variogramme..... | 9 |
| II-7.3. caractéristique du variogramme..... | 11 |
| II-7.4. Modélisation du variogramme..... | 15 |
| II.8. Le krigeage..... | 17 |
| II.8.1. Le krigeage simple..... | 17 |
| II.8.2. Krigeage universel..... | 19 |

Deuxième partie : Présentation du milieu physique

Chapitre III : Situation géographique

| | |
|--|----|
| III.1. Introduction..... | 21 |
| III.2. Cadre géographique..... | 21 |
| III.3. Aspect socio-économique de la région..... | 21 |
| III.3.1. Activités agricoles..... | 22 |
| III.3.2. Activités industrielles..... | 22 |

Chapitre IV : cadre géologique

| | |
|---|----|
| IV.1. Géologie régionale de l'Algérie septentrionale..... | 23 |
| IV.1.1. Zones internes..... | 23 |
| IV.1.2. Zones des flyschs..... | 23 |
| IV.1.3. Zones externes telliennes..... | 25 |
| IV.1.4. Parautochtone des Babors..... | 25 |
| IV.1.5. Parautochtone des Bibans..... | 25 |
| IV.1.6. Avant fosse..... | 25 |
| IV.1.7. Nappe numidienne..... | 25 |
| IV.2. Géologie de la région d'étude..... | 25 |
| IV.2.1. Situation géologique..... | 25 |
| IV.2.2. Les grands ensembles structuraux..... | 26 |
| IV.2.3. Lithostratigraphie..... | 28 |
| IV.2.4. La tectonique..... | 31 |
| IV.3. Conclusion | 31 |

Chapitre V : Cadre hydrogéologique

| | |
|--|----|
| V. 1. Introduction..... | 32 |
| V.2. Structure de l'aquifère..... | 32 |
| V.2.1. Partie amont (Sidi. Aich-Aguell)..... | 32 |
| V.2.2. Partie centrale (coupe c)..... | 35 |
| V.2.3. Partie avale(coupe D)..... | 37 |
| V.3. Extension des alluvions et volume du réservoir | 39 |
| V.1.3. Carte du mur des alluvions..... | 39 |
| V.4. Caractéristiques hydrodynamiques..... | 39 |
| V.4.1. Détermination des caractéristiques hydrodynamiques..... | 39 |

| | |
|-----------------------|----|
| V. 5. Conclusion..... | 42 |
|-----------------------|----|

Troisième partie : Analyse des données et interprétation

Chapitre VI : Analyse statistique des données

| | |
|--|----|
| VI.1. Introduction..... | 43 |
| VI.2. Acquisition et critique des données..... | 43 |
| VI.2.1. La perméabilité..... | 43 |
| VI.2.2. l'épaisseur..... | 45 |
| VI.3. Représentation des données..... | 45 |
| VI.3.1. La perméabilité..... | 45 |
| VI.3.2. L'épaisseur..... | 45 |
| VI.4. Examen des paramètres statistiques élémentaires..... | 47 |
| VI.4.1. Paramètre de position..... | 47 |
| VI.4.2 Paramètre de dispersion..... | 47 |
| VI.4.3. paramètre de forme..... | 48 |
| VI.5. Ajustement aux lois de probabilités..... | 49 |
| VI.6. Interprétation..... | 55 |

Chapitre VII : Etude géostatistique

| | |
|--|----|
| VII.1. Introduction..... | 56 |
| VII.2. Prévariogramme..... | 56 |
| VII.3. Variographie..... | 56 |
| VII.4. Construction du variogramme..... | 56 |
| VII.4.1. Variogramme de la perméabilité (K)..... | 57 |
| VII.4.2. Variogramme de l'épaisseur (e)..... | 58 |
| VII.5. Modélisation du variogramme..... | 59 |
| VII.6. Validation du variogramme..... | 62 |
| VII.7. Interprétation des cartes d'erreurs..... | 63 |
| VII.7.1. Cartes d'erreurs logarithmiques de la perméabilité..... | 63 |
| VII.7.2. carte d'erreurs des épaisseurs..... | 66 |
| VII.8. Interprétation des cartes krigées..... | 69 |
| VII.8.1. Carte krigée des Ln (k)..... | 69 |
| VII.8.2. carte krigée des épaisseurs (e)..... | 69 |
| VII.9. Conclusion..... | 74 |

Conclusion Générale

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

Introduction générale

Introduction générale :

L'identification des paramètres hydrodynamiques et la traduction des différentes informations sous forme de cartes constituent souvent le document de base pour l'hydrogéologie.

Pour résoudre les problèmes d'identification de ces paramètres, on procède classiquement par leur interpolation spatiale, par des méthodes de cartographies usuelles, à partir d'un échantillonnage le plus souvent fragmentaire et irrégulier dans l'espace.

Ces méthodes usuelles ont montré une insuffisance dans la précision de ces cartes de plus elles sont difficiles car la carte se fait manuellement.

Pour palier les inconvénients de ces méthodes, on procède à une autre méthode plus récente et plus fiable en se basant sur l'approche géostatistique.

Cette méthode permet :

- D'une part, l'analyse de la variabilité spatiale d'une propriété hydrodynamique, en particulier à l'aide du variogramme
- D'autre part, de reconstituer aux mieux la réalité à partir d'un échantillonnage irrégulier et d'apprécier la fiabilité des estimations faites par le krigeage.

Les objectifs fixés dans cette étude sont

- De cartographier les grandeurs de la perméabilité (K) et l'épaisseur (e) de l'aquifère alluvionnaire de la basse vallée de la Soummam par la technique géostatistique basée sur la théorie des variables régionalisées;
- Déterminer l'auto corrélation de ces variables en fonction du variogramme ;
- Analyser les cartes obtenues.

Pour y arriver à effectuer notre travail, nous adoptant le plan de suivant :

- Première partie : théorie et le formalisme de l'approche géostatistique.
 - Chapitre I : rappel des méthodes non probabilistes ;
 - Chapitre II : méthodes non probabilistes.
- Deuxième partie : présentation du milieu physique.
 - Chapitre III : situation géographique ;
 - Chapitre IV : contexte géologique ;
 - Chapitre V : le cadre hydrogéologique.
- Troisième partie : Analyse des données et interprétations.
 - Chapitre VI : Analyse statistique ;
 - Chapitre VII : étude géostatistique et interprétations.

Première partie

CONCEPTION de l'approche géostatistique

Chapitre I

Méthodes d'estimation usuelles (non probabilistes)

I.1. Introduction:

Ces méthodes appréhendent le problème d'estimation d'une façon déterministe, c'est à dire qu'elles ne considèrent la valeur du paramètre mesuré en un point comme la réalisation d'un processus aléatoire.

I.2. Les méthodes d'interpolation :

Il existe une multitude de méthodes d'interpolation déterministe, les plus utilisées sont:

- La méthode de triangulation;
- La méthode polynomiale;
- La méthode des moindres carrés;
- La méthode de pondération.

I.2.1. Méthode de triangulation :

La méthode de triangulation est la plus utilisée en hydrogéologie elle est basée sur l'hypothèse de linéarité du paramètre en deux points de mesure, il s'agit d'une méthode facile en conception.

Elle consiste en l'élaboration d'un réseau de maille triangulaire reliant les points de mesure.

L'interpolation linéaire des courbes d'isovaleurs se fait entre deux points pris deux à deux.

La méthode devient rapidement fastidieuse lorsqu'elle se fait naturellement et sur un nombre important d'observations, avec le risque de conflit lors du chaînage des courbes d'isovaleurs.

I.2.2. Méthode polynomiale :

L'utilisation des ordinateurs a permis de ne pas se limiter à l'interpolation linéaire mais l'utilisation des méthodes basée sur les fonctions polynomiales comme des valeurs observées.

Ces fonctions polynomiales comme modèles des valeurs observées sont de degrés 1 ont la forme suivante:

$$Z(x,y) = \sum_i A_i p_i(x,y)$$

Où:

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

$P_i(x,y)$: Représente des monômes de degré (i) en $(1, x, y, x^2, y^2, xy, \text{etc} \dots)$;

A_i : Sont les coefficients d'ajustement pour le calcul des valeurs aux points de mesure.

I.2.3. Méthode des moindres carrés :

La méthode des moindres carrés est une technique d'interpolation où on suppose que la variable étudiée est régulière dans l'espace et elle peut être décrite par une fonction mathématique $M(x, y)$.

A cette fonction, il superpose une erreur $\sum(x, y)$ de moyenne nulle, de variance constante et sans auto-corrélation.

$$Z(x, y) = M(x, y) + \sum(x, y)$$

On ne cherche plus à contraindre la surface d'ajustement de passer par les points expérimentaux.

On constate d'imposer que les écarts-types aux points de mesure réels et valeurs reconstituées par la fonction choisie à être minimum.

$$\sum_{j=1}^n [(A_j M_j(x, y) + \sum(x, y))] \quad \text{minimum} [i=1, \dots, n].$$

I.2.4. Méthode de pondération :

Les méthodes de pondération sont des techniques, basées essentiellement sur une hypothèse d'homogénéité du paramètre.

Elles consistent à affecter des poids inégaux aux points de même en fonction de leurs proximités respectives par rapport au point à estimer.

Parmi ces méthodes on peut citer:

- Méthode de pondération par distance ;

- Méthode des polygones d'influence.

I.3. Conclusion :

Les méthodes non probabilistes, aussi différentes par leurs approches du problème d'estimation, que leur relative complexité de mise en œuvre automatique, ne conduise pas la structure propre du paramètre.

Elles s'appliquent par conséquent, de la même manière aux variables régulières ou aléatoires et ne donne pas la variance d'estimation, c'est à dire, pas d'intervalle de confiance sur la valeur estimée.

Chapitre II

Méthodes probabilistes

II-1. Introduction :

Les méthodes géostatistiques, ont des avantages par rapport aux méthodes non probabilistes, avantages qui seront précisés plus loin.

La géostatistique est principalement basée sur la théorie des probabilités et des processus stochastiques.

Dans cette étude, notre champ d'application est le domaine hydrogéologique où nous abordons successivement:

- Une introduction pour donner une définition et les méthodes d'estimation géostatistiques.
- Des Notions de base de la géostatistique et des hypothèses de calcul.
- Un exposé des méthodes d'identification automatiques des paramètres hydrogéologique basées sur cette approche géostatistique (variogramme, krigeage, cartographie).

II-2. Définition :

Le terme géostatistique désigne évidemment l'emploi de la statistique dans l'étude des phénomènes géologiques.

Il existe en effet, un grand nombre de phénomènes de cet ordre qui peuvent être décrits par une série de chiffres qu'ils convient de coordonner et d'étudier selon les lois de la statistique (Mathéron, 1962).

Au sens plus large, la géostatistique est un outil d'estimation et d'étude des caractéristiques spatiales d'une variable régionalisée

Alors que la théorie de la géostatistique démarre de l'idée que toutes les variables régionalisées ont un aspect aléatoire.

La géostatistique peut ainsi être présentée comme extension des méthodes de type statistique ou analyse des données, en ceci qu'elle tient de l'organisation spatiale des variables étudiées.

II-3. But de la géostatistique :

Le but de la géostatistique est d'étudier tout phénomène qui peut être quantifié et qui se développe de façon structurée dans l'espace (et/ou) dans le temps.

La géostatistique est principalement basée sur la théorie des probabilités et des processus stochastiques, elle a les objectifs suivants:

- Analyse structurale et interprétation du phénomène considéré;
- Cartographie;
- Evaluation et prédiction;
- Simulation utilisant des modèles numériques.

II-4. Caractères généraux de la géostatistique :

II-4-1. Variable régionalisée :

Par variable régionalisée, nous entendons une fonction d'espace, dont la valeur varie d'un lieu à l'autre avec une certaine apparence de continuité, sans qu'il soit en général possible d'en représenter la variation par une loi mathématique extrapolable (Matheron, 1962).

Ce terme, variable régionalisée, a été utilisé pour définir un phénomène se déployant à travers le temps et l'espace, dont les valeurs varient d'un lieu à un autre avec une apparence de continuité (Journal et Huijbert, 1978 in Azouzi, 1993), sans qu'il soit possible de représenter sa variation par une loi mathématique extrapolable.

II-5. Application :

Soit $z(x)$ la valeur de la variable au point x , le problème est de représenter la variabilité de la fonction $z(x)$ quand x varie.

Cette représentation utilisée pour représenter et pour résoudre le problème de la valeur $z(x_0)$ en un point x_0 ou aucune n'est disponible.

La géostatistique résout ce problème, en supposant que chacune des variables aléatoires V.A représente une réalisation particulière d'une fonction aléatoire F.A (variable aléatoire auto corrélée).

Ainsi donc caractériser la variabilité de $z(x)$ revient à modéliser les corrélations entre les différentes variables aléatoires constituant la F.A.

L'interprétation probabiliste de la variable régionalisée comme une réalisation particulière d'une certaine fonction aléatoire n'a de sens que s'il est possible de connaître entièrement la loi de probabilité qui le définit.

A ce jour, la géostatistique a été appliquée avec succès dans différents domaines comme l'exploitation minière, la géophysique, la géochimie, l'hydrogéologie, la géotechnique et plus généralement dans toutes les disciplines des sciences de la terre.

II-6. Notion des moments et hypothèses sur la fonction aléatoire :

II-6.1. Les moments :

a. Moment d'ordre 1 :

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

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

$E(x)$ donc est une moyenne pondérée: c'est la moyenne des variables possibles, pondérés par leurs probabilités.

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

b. Moment d'ordre 2 :

Les trois moments de l'ordre 2 sont :

- **La variance :**

La variance est définie par :

$$\sigma^2 = E[(x - m)^2] = E(x) - m^2$$

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

- **La covariance :**

Si l'on a deux variables aléatoires $z(x_1)$, $z(x_2)$ qui ont des variances, elles ont aussi des covariances (Journel, 1990)

$$\text{COV}[z(x_1), z(x_2)] = E[z(x_1)-m_1](z(x_2)-m_2)]$$

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

- **Le variogramme :**

Le variogramme est la variance de l'accroissement $(z(x_1)-z(x_2))$.

Le variogramme peut exister quand la covariance existe.

L'hypothèse d'existence de la covariance étant plus forte que celle du variogramme, on préfère en géostatistique l'outil variogramme à la covariance.

Le variogramme synthétise d'une façon quantitative l'information sur la variabilité spatiale du paramètre d'un point à un autre du domaine.

II-6.2. Hypothèse sur la fonction aléatoire :

Une fonction aléatoire est un ensemble de variables aléatoires auto corrélées tel que l'ensemble de ces derniers prend un certain nombre de valeurs numériques selon une certaine loi de distribution de probabilité (in Bouhouhou, 1991).

Le problème qui se pose c'est que la fonction n'est pas assez connue ni dans l'espace ni dans le temps, il faut partir avec les hypothèses suivantes :

a. Hypothèse de stationnarité :

La fonction aléatoire est dite stationnaire au sens stricte 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 .

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

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 $z(x)$;

b. 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 $x, x+h$

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

$$\text{VAR} [z(x+h)-z(x)] = 2\gamma(h)$$

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

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

c. Hypothèse d'érgodicité :

Cette hypothèse consiste que la réalisation unique étudiée suffit à rendre compte de l'ensemble des réalisations éventuelles (Brière, Rezak, 1982 in Azouzi 1993).

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

II-7. Le variogramme :**II-7.1. Définition :**

Pour caractériser l'aspect aléatoire de la fonction $Z(x)$ par des paramètres constants dans l'espace du domaine parcouru par la variable régionalisée $z(x)$ une notion nouvelle, le variogramme, a été introduite.

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 définit comme suit :

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

Sous l'hypothèse intrinsèque :

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

On obtient

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

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

II-7.2. Estimation du variogramme :

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

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

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 se fait point par point et cela, en adaptant un pas de distance h et en acceptant une certaine tolérance Δh dans le choix des couples de point par rapport à ce pas de distance. Cette tolérance est classiquement égale à $h/2$.

Ainsi, pour chaque couple de classe de distance (h) on obtient une valeur de $\gamma(h)$ moyenne, en considérant tous les couples séparés par la distance $h - \Delta h$ à $h + \Delta h$.

Le variogramme expérimental n'est construit que sur distances inférieures à la moitié de la plus grande longueur de surface d'échantillonnage :

Le choix d'un pas de distance qui ne doit être ni petit, ni trop grand, le nombre de couples dans chaque classe sera trop faible pour l'estimation moyenne de γ . Par contre s'il est trop grand, le calcul prend en compte un nombre de couple important, mais avec une grande tolérance mais, cela entraîne un lissage excessif du variogramme avec risque de cacher certaines particularités de la structure spatiale de la variable. A ce propos de nombreux auteurs (Delhomme, 1976 et Hugbreghs, 1978 in Azouzi, 1993) recommandent un certain nombre de couples supérieur à 50 pour chaque classe.

Le calcul et le choix de la distance maximale de calcul qui ne doit pas dépasser le seuil défini par la moitié de la plus grande longueur de la surface de l'échantillonnage, comme le suggère Voltz (1986) et Garsciel-Odoux (1991).

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

- **Le variogramme expérimental :**

Si on a N couples de données distants de h , le variogramme expérimental est exprimé par :

$$2\delta'(h) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [z(x_i + h) - z(x_i)]^2$$

- **Le variogramme théorique**

Il est donné par l'expression suivante :

$$2\delta'(\alpha) = E[2\delta'(h)]$$

On distingue quatre types de comportement à l'origine de.

a. Comportement parabolique :

Cette allure parabolique à l'origine caractérise une variable dérivable et continue (fig.I.1) et avec une variabilité spatiale hautement régulière.

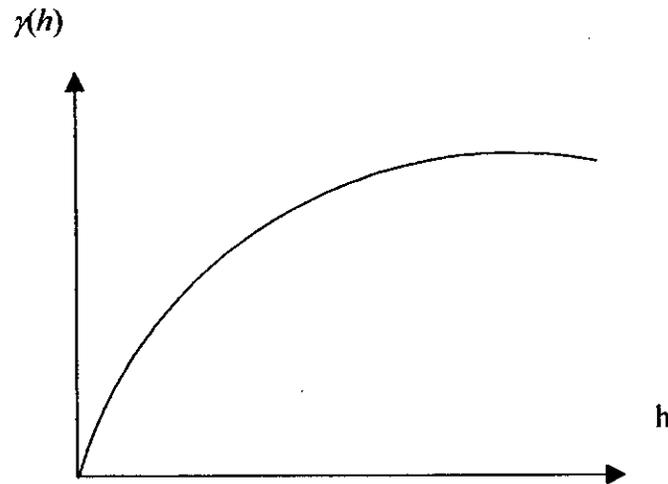


Figure.II.1 : comportement parabolique (dérivable)

b. Comportement linéaire :

L'allure linéaire caractérise une variable moins régulière que la première (fig.I.2).

La fonction $\delta(h)$ n'est plus dérivable à l'origine.

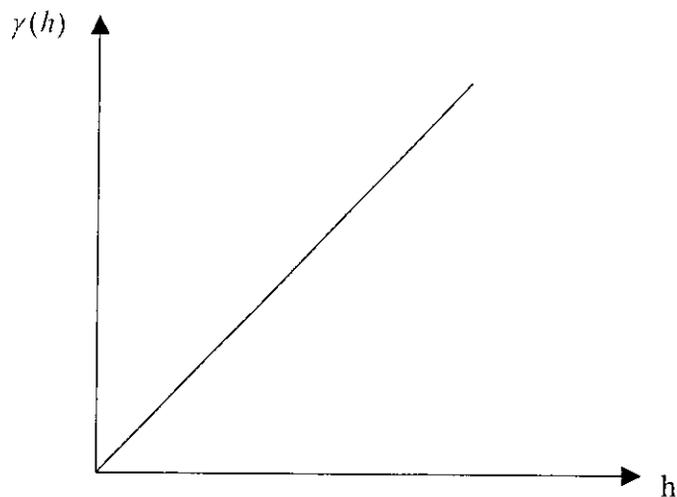


Figure.I.2 : comportement linéaire

c. Discontinuité à l'origine :

On peut appeler aussi l'aspect pépité ou $\gamma(h) \neq 0$ si $h=0$ normalement, mais fréquemment présente une ordonnée à l'origine non nulle, cette quantité présente l'effet de pépité (fig.1.3), cet effet pépité est due soit :

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

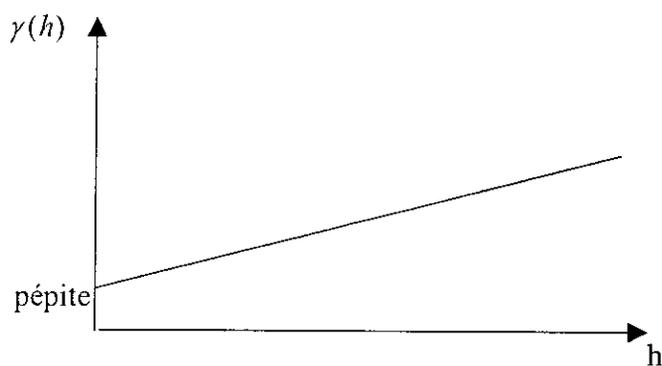


Figure.I.3: effet pépité

d. Aspect plat:

Dans ce cas la fonction $\gamma(h)$ se réduit à une droite parallèle à l'axe de distance (fig.I.4), autrement dit la structure du phénomène est purement aléatoire.

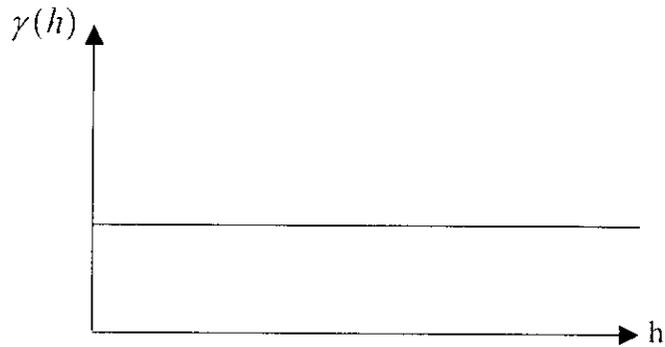


Figure.I.4 : effet pépité pur (aléatoire)

II.7.3.2. Comportement à l'infini :**a. Variogramme borné :**

Quand h devient plus grand $\gamma(h) \rightarrow \infty = c(0)$ appelé palier. La distance à laquelle $\gamma(h)$ atteint son palier est appelée portée.

Au-delà de cette distance les variables $z(x)$ et $z(x+h)$ ne sont plus corrélées, $\gamma(h)$ prend une allure qui est considérée comme sa forme idéale et dans ce cas on l'appelle variogramme borné (fig.I.5).

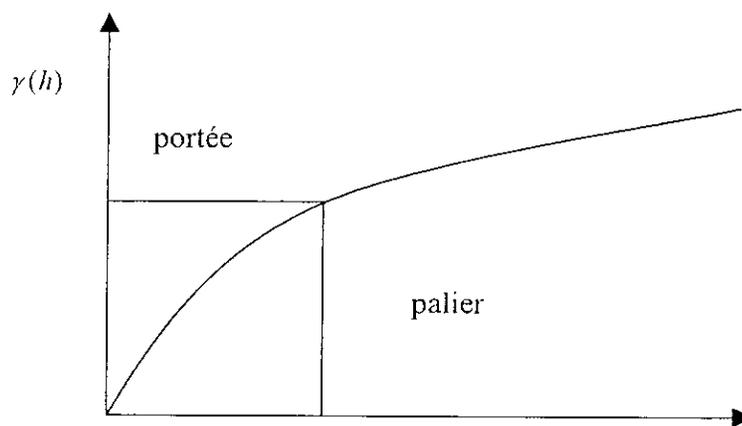


Figure.I.5 : Variogramme borné

$$\delta(h) = c(0) - c(h)$$

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 (fig.I.6).

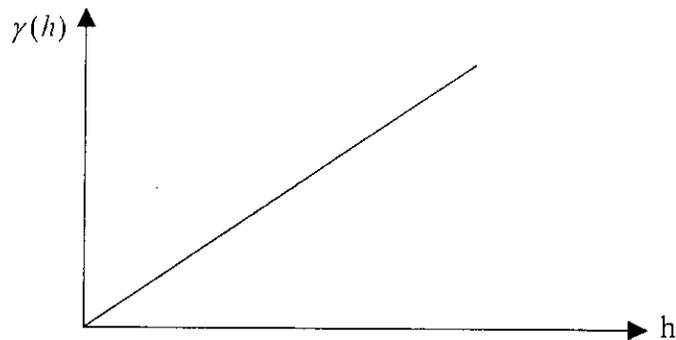


Figure.I.6 : Variogramme non borné

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.

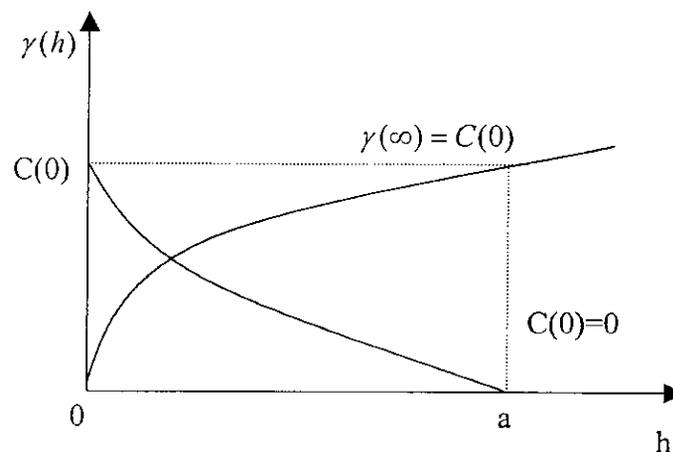


Figure.I.7 : Covariance et variogramme

II-7.4. 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:

$$\gamma(h) = \omega|h|^{\lambda}$$

Le modèle linéaire est un modèle sans palier (fig.I.8)

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

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

Ce modèle présente un schéma de transition avec un comportement linéaire à l'origine (fig.I.10).

c. Modèle exponentiel:

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

C'est un schéma de transition à palier avec comportement linéaire à l'origine (fig.I.9)

d. Modèle gaussien:

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

Le modèle gaussien est un modèle qui présente un schéma de transition à palier avec un comportement parabolique à l'origine (fig.I.9).

Avec :

$\gamma(h)$: Variogramme ;

ω : Le palier de la fonction ;

a : représente la portée du variogramme.

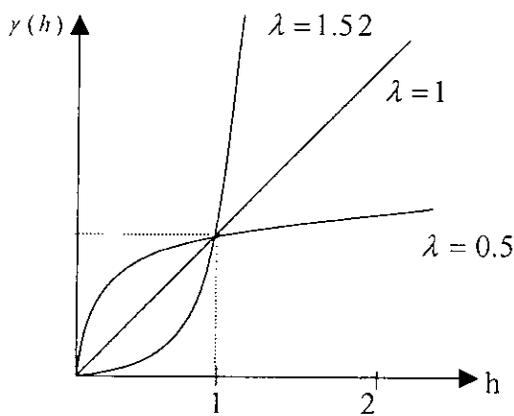


Figure.I.8 : Modèle linéaire

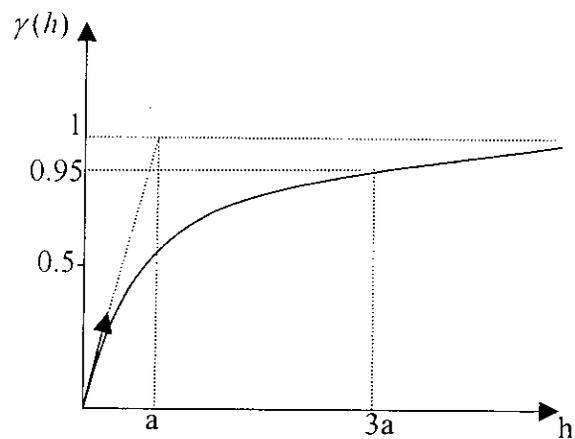


Figure.I.9: Modèle exponentiel

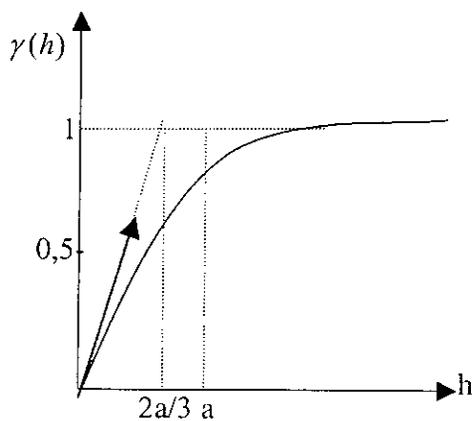


Figure.I.10 :Modèle sphérique

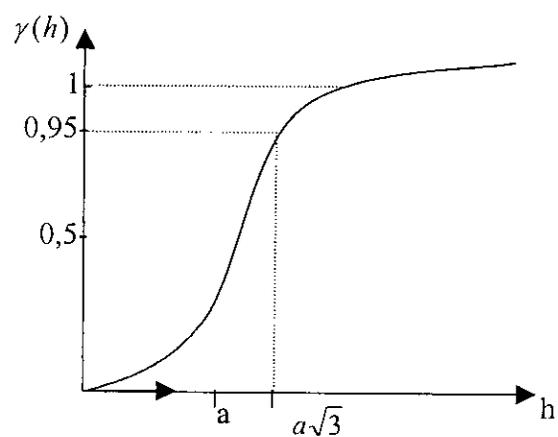


Figure.I.11 : Modèle gaussien

II.8. Le krigage :

Le krigage est une technique d'estimation qui remplace les procédés traditionnels tel que l'inverse des distances, polygones d'influence, etc.

Cette technique permet de déterminer les coefficients de pondération pour l'estimation optimale (Dupuy, 1969 in Azouzi 1993).

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

Avec

Z_0^* : estimateur au point x_0 ;

Z_i : valeur observée au point i ;

λ_i : coefficient de pondération;

n : nombre de points observés;

Il s'agit de déterminer les points de pondération, qui donneront la meilleure estimation z_0 au point x_0 .

Le krigage se distingue des autres techniques par le fait que le:

- * Système de krigage est toujours régulier ;
- * Krigage est un interpolateur exact.

On distingue deux types de krigage :

- Krigage simple (cas stationnaire);
- Krigage universel (cas non stationnaire).

II.8.1. 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 :

La condition de non-biais consiste à annuler la moyenne des erreurs, ceci conduit donc à dire que l'espérance mathématique de différence de la valeur krigée et la valeur réelle est nulle, on a donc:

$$\begin{aligned}
 E\{z_v - z_k^*\} = 0 &\Rightarrow E\{z_v - \sum_{i=1}^n \lambda_i z_i\} = 0 \\
 &\Rightarrow E\{z_v\} - E\{\sum_{i=1}^n \lambda_i z_i\} = 0 \\
 &\Rightarrow E\{z_v\} - \sum_{i=1}^n \lambda_i E\{z_i\} = 0
 \end{aligned}$$

Or $E\{z_v\} = E\{z_i\} = m \Rightarrow m[1 - \sum_{i=1}^n \lambda_i] = 0 \Rightarrow \sum_{i=1}^n \lambda_i = 1$

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 :

$$VAR(z^*_0 - z_0) = 0 \quad \text{minimum} \dots \dots \dots (*)$$

La variance d'estimation doit être minimale puisque la précision de l'estimation projetée est une donnée non négligeable du moment où elle caractérise la qualité de cette estimation. Cette dernière est d'autant plus précise que sa variance d'estimation est plus faible.

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 pour avoir le minimum de :

$1/2 E[(z^*_0 - z_0)^2 - \mu (\sum \lambda_i - 1)]$, qui s'obtient en annulant les dérivées partielles par rapport λ_i et μ ce qui donne

$$\sum_{i=1}^n \lambda_j \delta(x_i - x_j) + \mu - \delta(x_i - x_0)$$

$$\sum_{i=1}^n \lambda_j = 1 \quad i = 1,$$

Ce système est un système linéaire de (n+1) équations à (n+1) inconnus (les λ_i et μ).

On pose:

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

Le système s'écrit sous la forme matricielle suivante:

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

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 λ_i calculée dans l'expression de l'estimateur.

• Calcul de la variance d'estimation:

La variance d'estimation est obtenue en remplaçant les valeurs de λ_i , $\gamma(x_i, x_0)$ et μ , données par la résolution du système d'équation (***) dans l'équation (**).

On obtient:

$$\text{VAR}(z^*_0 - z_0) = E[(z^*_0 - z_0)^2] = \sum_{i=1}^n \lambda_i \gamma(x_i - x_0) + \mu \quad \text{****}$$

L'écart type sera donnée par :

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

La connaissance de la variance d'estimation donner par l'équation (****) n'est pas suffisante.

Pour connaître l'intervalle de confiance de l'estimateur dans l'hypothèse de la loi de distribution normale (gaussienne) des erreurs d'estimation, l'intervalle de confiance à 95%.

$$Z_0 = z_0(2\sigma) = \sum_{i=1}^n \lambda_i z_i + \sigma.$$

II.8.2. Krigeage 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.



Deuxième partie
Présentation du milieu physique

Chapitre III Situation géographique

III.1. Introduction :

Le but principal de ce chapitre est de présenter les caractéristiques générales du bassin versant dit " Basse Soummam " à savoir sa situation géographique et ces formations géologiques susceptibles d'être aquifères.

III.2. Cadre géographique :

La basse Soummam est une partie intégrante du bassin versant de la Soummam, située à la limite entre le massif de la grande Kabylie et les montagnes des Biban au sud.

La basse Soummam est située environ 230Km au nord Est d'Alger (Fig.III.1).

Elle s'étend de Sidi Aïch jusqu'à la mer sur une distance de 45Km couvrant une superficie de 808Km².

Les principales villes de cette région sont: Sidi Aïch à l'Ouest, Adekar au Nord, Amizour au Sud et de Béjaïa à l'Est.

Le bassin versant de la Soummam est traversé d'Ouest en Est par l'oued Soummam qui décrit une série de méandres d'autant plus accentués que l'on se rapproche de l'exutoire.

Le bassin versant de la basse vallée est limitée:

- Au sud par les chaînons des Babor et de Biban;
- Au Nord par les monts de Taourirt Ighil, les crêtes de Djebel Gouraya;
- A l'Ouest par le seuil de Sidi Aïch;
- A l'Est par la mer Méditerranée.

III.3. Aspect socio-économique de la région :

La basse Soummam est une région à diverses activités économiques, parmi lesquelles, on peut citer:

- Les activités agricoles;
- Les activités industrielles.

III.3.1. Activités agricoles :

Cette région est à vocation agricole, on y cultive des céréales, des oliviers, des vignes, des maraîchages, des agrumes et d'autres arbres fruitiers, ...etc.

III.3.2. Activités industrielles :

L'industrie occupe une place importante dans cette région. Parmi les principales industries existantes, on trouve:

Les unités textiles (E.CO.TEX, COTITEX, ...).

NAFTAL, S.N.S, E.N.C.G, ENJUC, Papeterie,

La région possède un potentiel humain très important ce qui induirait automatiquement à de forte consommation en eaux.

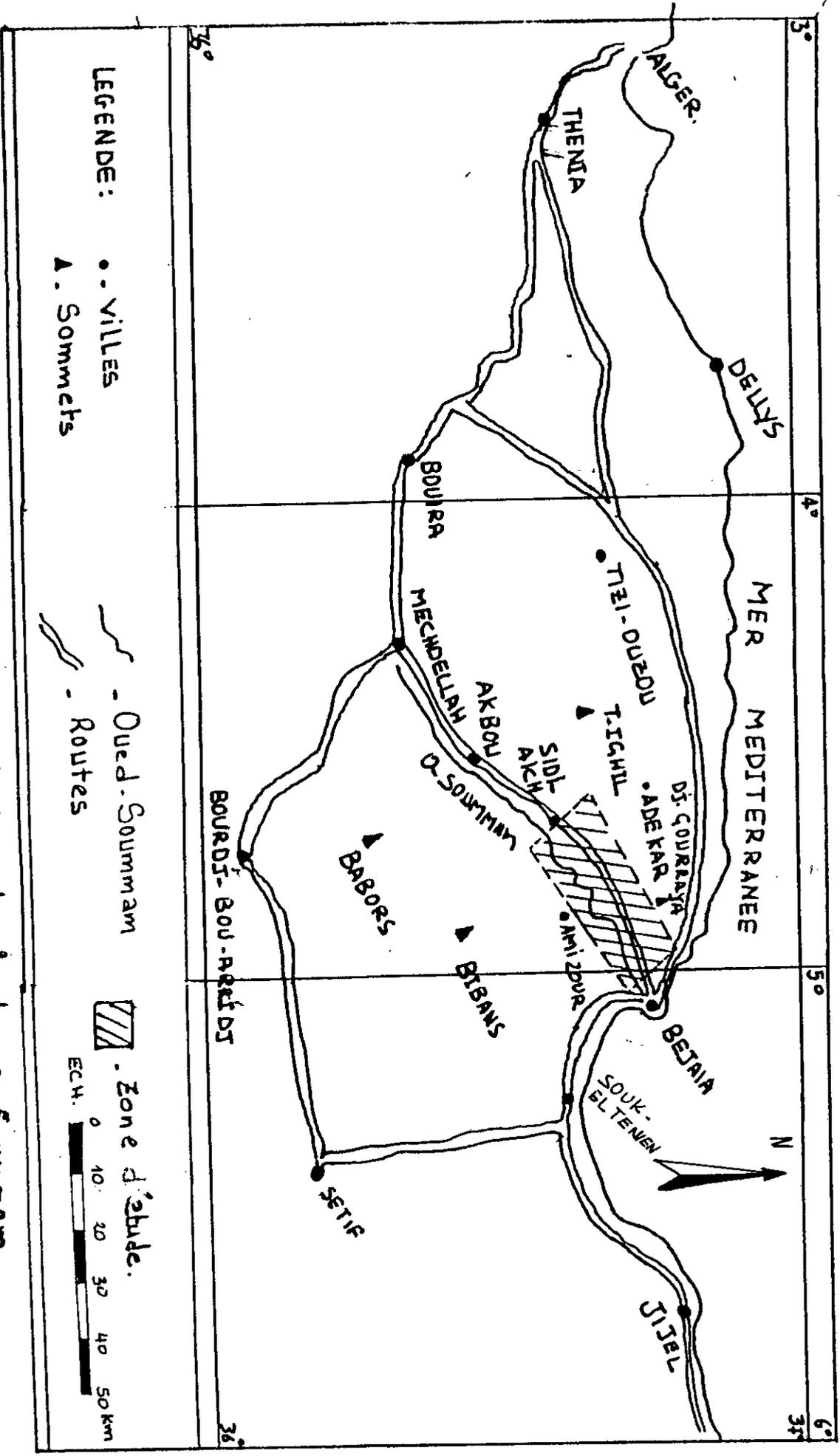


Figure III.1 Carte de situation de la basse-Soummam.

Chapitre IV
Cadre géologique

Dans cette étude nous décrivons la lithologie, ainsi que la structure géologique dans le but d'identifier les horizons aquifères.

IV.1. Géologie régionale de l'Algérie septentrionale :

Les maghrébides sont une partie de la chaîne Alpine périméditerranéenne qui est un domaine très affecté par des déformations d'âge Mésozoïque Géozoïque. Ces derniers nous distinguons les zones suivantes: (fig.IV.1)

IV.1.1. Zones internes :

Elles sont constituées essentiellement par le socle cristallin et la couverture d'âge paléozoïque. Sur cette dernière viennent en discordance :

- Les termes argilo-gréseux d'âge triasique ;
- Des calcaires et monocalcaires d'âge jurassique ;
- Des niveaux détritiques d'âge éocène et oligocène.

IV.1.2. Zones des flychs :

Ces zones sont constituées de flychoïdes: quartzo-pélitiques, marnocalcaires, conglomérats et microbrèches. Ils sont essentiellement d'âge créacé inférieur Oligo-Miocène inférieur.

Ces flychs sont découpés en deux grands types:

- Les flychs Mauritaniens

En position Sud sous le dorsale Kabyle par l'intermédiaire d'un contact anormal.

- Les flychs Massyliens

En position Nord reposant sur le socle Kabyle de façon allochtone.

IV.1.3. Zones externes telliennes :

Elles sont constituées par un ensemble d'unités allochtones et parautochtones:

- Nappes ultratelliennes: formation d'âge Néocomien à Eocène moyen.
- Nappes épitelliennes: D'âge triasique, Crétacé et Eocène.
- Nappes infratelliennes: elles sont formées d'une succession d'unités d'âge Sénonien-Eocène et Oligocène.

IV.1.4. Parautochtone des Babors:

Il est Composé d'une formation gypsifère triasique, un jurassique essentiellement calcaire et au sommet un crétacé marneux.

IV.1.5. Paratochtone des Bibans :

Il se présente sous forme d'un large bombement anticlinal d'âge crétacé inférieur et supérieur essentiellement détritique et calcaire et au sommet un crétacé marneux.

IV.1.6. Avant fosse :

Elle recouvre l'autochtone Sud telliens est composé du terrain Miocène.

II.1.7. Nappe numidienne :

Elle est d'âge oligocène supérieur à la base, Aquitanien terminal à Burdigalien inférieur vers le sommet. Elle est composée d'épaisses barres de grès grossier essentiellement quartzeux (Hassissen 1989 in Mhidi, 1993).

IV.2. Géologie de la région d'étude :**IV.2.1. Situation géologique :**

La plaine alluviale de la basse Soummam constitue une zone de passage entre le domaine externe et le domaine interne. C'est une zone déprimée où se sont accumulés des sédiments miocènes, Pliocènes et quaternaires.

Elle est délimitée au Nord par le tell septentrional et au Sud par le tell méridional.

De ce fait, elle présente du point de vue structural, une grande complexité due à la superposition des ensembles géologiques de chacun de ces deux domaines cités précédemment.

VI.2.2. Les grands ensembles structuraux :

Les principales unités structurales qui caractérisent la géologie de la basse Soummam sont:

- Les unités allochtones Kabyles ;
- Les unités épitelliennes ;
- Le socle cristallin et sa couverture tertiaire ;
- Les formations post nappe de la vallée de la Soummam.

a. Les unités allochtones Kabyles :

Ce sont elles que l'on rencontre le plus souvent dans la zone d'étude.

Elles recouvrent entièrement le domaine interne et externe de l'orogénèse Alpine. Elles sont représentées par:

- **Les flyschs Massyliens :**

Ils affleurent essentiellement au Nord et au Sud du massif de Bouhatem et au Sud d'Aghbalou le long de la vallée de oued Ghir. On les rencontre également à l'Ouest entre Sidi Aich et Il Mathen et au Sud Est de la région d'Amizour.

D'après Leiline, Hassissen et Gelard (in Mhidi.1993), ces séries sont relativement complétées allant du crétacé au Maastrichtien (Sénonien).

- **Les flyschs Maurétaniens :**

Ces flyschs se présentent sous forme d'écaillés localisées au Nord du massif de Bouhatem. Ils sont structurellement positionnés entre les flyschs massyliens et numidiens.

Les flyschs Maurétaniens sont d'âge crétacé inférieur à paléozoïque et sont souvent affectés par de nombreuses failles et de jeux tectoniques.

- **les flyschs numidiens :**

Il s'agit de l'unité la plus répandue dans la région. Elle repose sur toutes les autres unités inférieures occupe la position structurale la plus élevée. Elle est essentiellement d'âge Oligocène supérieur, Aquitanien et Budigalien.

b. Unités épitellienne supérieures :

Elles sont localisées en rive gauche de la vallée, et du Nord au Sud et sont représentées par les unités suivantes:

- **Unité Gouraya-Aghbalou :**

Elle est limitée au Nord par l'accident majeur d'Achelouf et au Sud par l'accident d'Aghbalou.

Cette unité apparaît en fenêtre à travers les unités allochtones Kabyles et est constituée par des formations d'âge jurassique et crétacé. Elle est très fracturée, donnant des réseaux de failles normales.

Les rejeux successifs en failles inverses décrochent des sénestres et dextres et en failles normales ont pour résultat la distinction de deux compartiments:

- L'un occidental: Dj Aghbalou et Ifri Ouzen formant une structure anticlinale déversée vers le Sud ;
- L'autre oriental: Dj Gouraya représentant une moitié d'anticlinal déversée vers le Sud.

- **Unité de Barbacha :**

Elle est mise en évidence en rive droite de la vallée, elle est d'âge triasique à crétacé. Elle est chevauchante sur l'unité de Dra el Arba et chevauchée au Nord par les unités allochtones.

c. Socle cristallin et sa couverture mésozoïque :

Ils appartiennent au domaine interne de l'orogénèse Alpine.

Ils affleurent au niveau du village de Bouhatem où l'on relève des termes métamorphiques éruptifs.

Du point de vue tectonique, l'unité du socle cristallin et sa couverture tertiaire sont affectées par une déformation ductile, redécoupées par deux familles de failles.

Les contacts entre les massifs anciens et les unités allochtones qui les recouvrent sont tous orientés vers le Sud.

d. Formation post nappes :

Ces dernières affleurent essentiellement en bordure de la plaine en rive droite, néanmoins certains affleurements sont présents loin de la vallée. Dans cet ensemble nous remarquerons deux types de formation:

- Les formations néogènes éruptives: elles affleurent dans la région d'Amizour et au Sud du Béjaia sur le versant de la vallée.

- Les formations sédimentaires du Miocène, Pliocène et des alluvions du quaternaire et la plaine proprement dite.

IV.2.3. Lithostratigraphie : (fig.IV.2)

a. Le trias :

Il comprend deux types de Faciès:

- **Le faciès tellien :**

Il est représenté par des formations gypso-salines et des argiles versicolores. Il souligne des contacts de charriage comprenant des Klippes et lentilles resédimentées dans des formations plus récentes. Ce trias se rencontre à l'Est de Sidi Aich et au Sud d'Amizour.

- **Le faciès alpin :**

Il est représenté par des formations grésodolomitiques non présent dans notre région d'étude

b. Le jurassique :

Il est composé de quatre termes principaux:

- Le lias inférieur formé à la base par des dolomies plus aux moins stratifiées, souvent recristallisées, de teinte rouge violacée. Ces dolomies sont surmontées par des calcaires massifs localement oolithiques et parfois typiquement dolomitique ;
- Le lias moyen formé de calcaire stratifié à silex à la base et intercalé de ban de conglomérats. Dans l'unité de Barbacha les calcaires à silex alternent avec des argiles ou des marnes ;
- Le lias supérieur est essentiellement formé par des calcaires noirs à silex surmontés par une épaisse série marno-calcaire ;
- Le jurassique moyen supérieur composé de trois séries marno-calcaires.

Le plus souvent, il est le siège d'une tectonique cassante très intense localement karstifiée.

c. Le crétacé :

Il est caractérisé par deux types de faciès:

- **Le crétacé à faciès tellien :**

Il constitue principalement les unités de Soura-Aghbalou et Barbacha.

Il comporte deux ensemble lithologiques :

- Une alternance marno-calcaire débutant par un conglomérat de base à éléments jurassiques supérieur. Cet ensemble est du néocomien ;
- Une série de pélites noires contenant un conglomérat à matrice pélitique de l'Albien.

- **Le crétacé des flychs Massyliens :**

Il affleure largement sur le versant Nord de la ville où il repose par l'intermédiaire d'un contact anormal sur les formations du crétacé tellien. Il comprend une série grés-pélitique recouvrant toute la vallée de oued Ghir.

En général, le crétacé est dans l'ensemble grés-carbonaté à grés-pélitique avec une alternance de bancs de marnes.

d. L'oligocène-miocène :

Cet ensemble comprend deux types:

- **L'oligo-miocène kabyle :**

Il est constitué de conglomérats, marnes gréseuses et calcaires gréseux lenticulaires. L'oligo-miocène Kabyle n'affleure pas le long de la vallée.

- **Le numidien :**

Le numidien comprend de la base au sommet:

- Des argiles rouges, vertes ou grises dites « Argiles sous numidiennes ». Elles affleurent essentiellement dans la partie occidentale à l'Ouest de Sidi Aich et sont datées oligocène supérieur.
- Des grés grossiers à bancs très épais vers le sommet intercalés de pélites noires. Ils sont datés miocène inférieur (Aquitaniens).
- Des argiles noires et niveaux de silex daté de l'aquitaniens du versant Nord de la vallée et de l'encaissement du massif éruptif de Amizour.

e. Le miocène :

Il est composé de deux formations :

• la formation sédimentaire :

Celle-ci comprend deux séries :

- Une série marine essentiellement marneuse conglomératique à la base d'âge Burdigalien-Langien ;
- Une série continentale discordante sur la précédente formée de grés fins et de grossiers comprenant aux sommets des microbrèches et microconglomérats. L'âge n'a pu être déterminé (caractère azoïque des grés).

Cette formation est rencontrée à l'Ouest de Sidi Aich sur le versant nord et, au Sud dans le massif de oued Amizour.

• Les formations magmatiques :

On les rencontre le long de la vallée sur le versant Sud, entre Bejaia et oued Amizour. Elles sont essentiellement formées de roches plutoniques et volcaniques.

- les roches volcaniques : Elles sont représentées par des tufs andésitiques, d'épaisseur d'environ 400m. elles sont profondément altérées et fracturées
- les roches plutoniques : elles sont représentées par des quartzites, des monzonites et des granodiorites. Ces roches sont fortement altérées et fracturées.

f. Le pliocène :

Il est représenté par deux faciès :

- Un faciès marin marneux passant latéralement à des argiles. Il affleure sur les bordures de oued Ghir et de oued Djibira.
- Un faciès continental formé de brèches et de poudingues affleurant au pied du Dj Gouraya et Bejaia ville.

g. le quaternaire :

Ce dernier est essentiellement formé :

- D'alluvions anciennes constituées de galets, graviers et de sable à matrice argileuse et sableuse ;
- De cônes de déjection des principaux affluents ;
- De brèches de pente consolidées et de cônes d'éboulis récents ;

- Des alluvions récentes formées de limons, sables de cailloutis au niveau du lit majeur de la Soummam.

IV.2.4. La tectonique :

Quatre phases tectoniques ont affecté les formations d'âge Mésozoïque :

- La phase néocomienne ;
- La phase sénonienne ;
- La phase paléogène ;
- La phase miocène.

Ces phases tectoniques ont profondément fracturé notre région d'étude. On y déclare deux grandes familles de failles.

Une de ces deux familles de failles constitue de vraie zone de drainage naturel d'eau : Aghbalou-Gouraya, oued Amizour, Timzirth et Il Mathen.

IV.3. Conclusion :

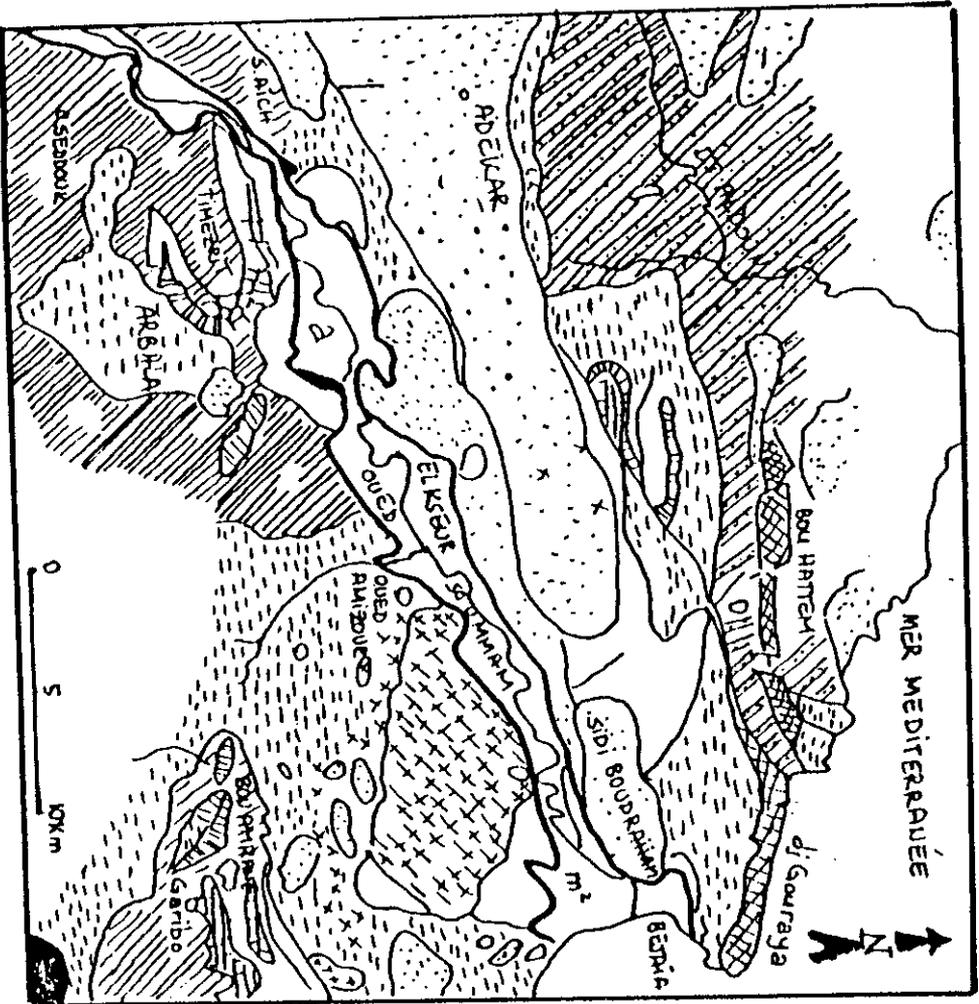
- La plaine constitue un sillon intramontagneux de la direction NE-SW
- Les formations géologiques susceptibles d'être aquifères dans notre région d'étude sont :
 - Le crétacé : le faciès telliens et flyschs Massyliens grésocalcaire de Gouraya, Aghbalou et de Barbacha ;
 - Le Miocène : comprenant les formations sédimentaires et magmatiques, ces dernières étant fortement altérées et fracturées ;
 - Le pliocène : faciès continental ;
 - Le remplissage alluvial quaternaire.

Cette étude nous a permis de donner la lithologie et la structure géologique dans le but d'identifier les horizons aquifères, qui nous apportent des informations sur l'hydrogéologie de la région, qui sera l'objet du chapitre suivant.

Figure IV.2

ESQUISSE GEOLOGIQUE DE LA BASSE SOUMMAN.

(D'après M. Leikine, 1971, B. Samroud, 1981, A. Costelle, M. Hassisssene 1989).
1979



LEGENDE

- | | | | |
|--|--|--|--|
| | ALLUVIONS, EBoulIS | | t. Trias gres rouge |
| | PLIOCÈNE | | Metamorphisme tertiaire |
| | m ¹ Miocène Supérieur | | Tufs d'ouïes |
| | m ¹ Miocène Inférieur | | g Granites tertiaires |
| | m ² Oligocène | | e' Lutétien |
| | m ³ Aquitainien | | ev. s Lutétien, Campanien cretacé supérieur |
| | e' Lutétien | | c ¹ Cénomannien inf. |
| | ev. s Lutétien, Campanien cretacé supérieur | | Flysch. |
| | c ¹ Cénomannien inf. | | Albo-Aptien |
| | Flysch. | | cretacé inf |
| | Albo-Aptien | | a. facies marneux. |
| | cretacé inf | | I ¹ Jurassique. Sup. |
| | a. facies marneux. | | I ¹ Lias. sup. Doggar |
| | I ¹ Jurassique. Sup. | | t. Trias gypso-selin |
| | I ¹ Lias. sup. Doggar | | |
| | t. Trias gypso-selin | | |
- contacts géologiques
 failles et contacts anormaux
- socle cristallin et sa couverture (Camb.)

Chapitre V Cadre hydrogéologique

V. 1. Introduction :

La plaine de la basse vallée de la Soummam, est bassin alluvionnaire, avec la présence sous les alluvions d'une formation grossière constituée de galets, de gravier (le plus souvent gréseux) et de sable attribuée au miocène. Ces deux formations étant parfois séparées par un niveau argileux.

La distinction entre ces deux formations n'a pu se faire sur des critères paléontologiques (l'absence microfossiles) ou sur des critères lithologiques (similitude des éléments), mais elle est fondée sur des critères d'ordre géométrique.

L'examen des coupes hydrogéologiques a permis d'identifier deux types de nappes aquifères, une nappe libre (de Sidi Aich à El kseur).

V.2. Structure de l'aquifère

Les travaux de la prospection géophysiques réalisés par la compagnie générale de la géophysique (CGG) en 1961 et 1970, ainsi que les sondages effectués dans la plaine de la Soummam en ont mis en évidence la structure du réservoir et sa forme géométrique.

L'examen hydrogéologique a permis de diviser cette zone en trois parties:

V.2.1. Partie amont (Sidi.Aich-Aguell) :

Deux coupes ont été faites (A et B), (fig.V.1 et fig.V.2), ces deux coupes montrent nettement un remplissage alluvionnaire très important dont le maximum peut atteindre 40m d'épaisseur avec une légère hétérogénéité latérale. Le substratum est marno-argileux.

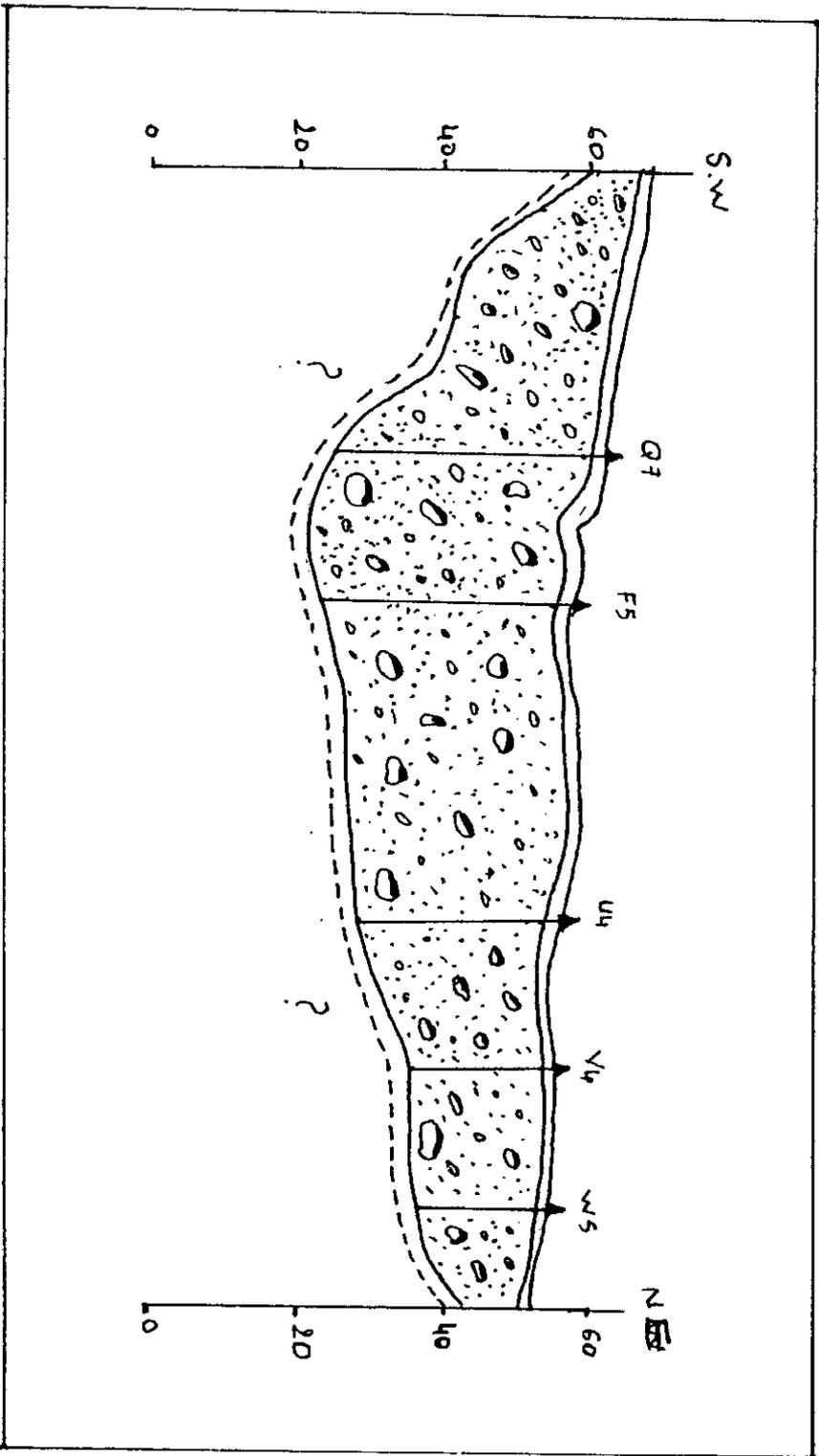
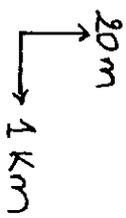


Fig. N°1: Coupe Géoelectrique (A) interprétative.

Echelle :



-  Terre végétale
-  Sables fins
-  Galets et graviers
-  Argiles ou marnes

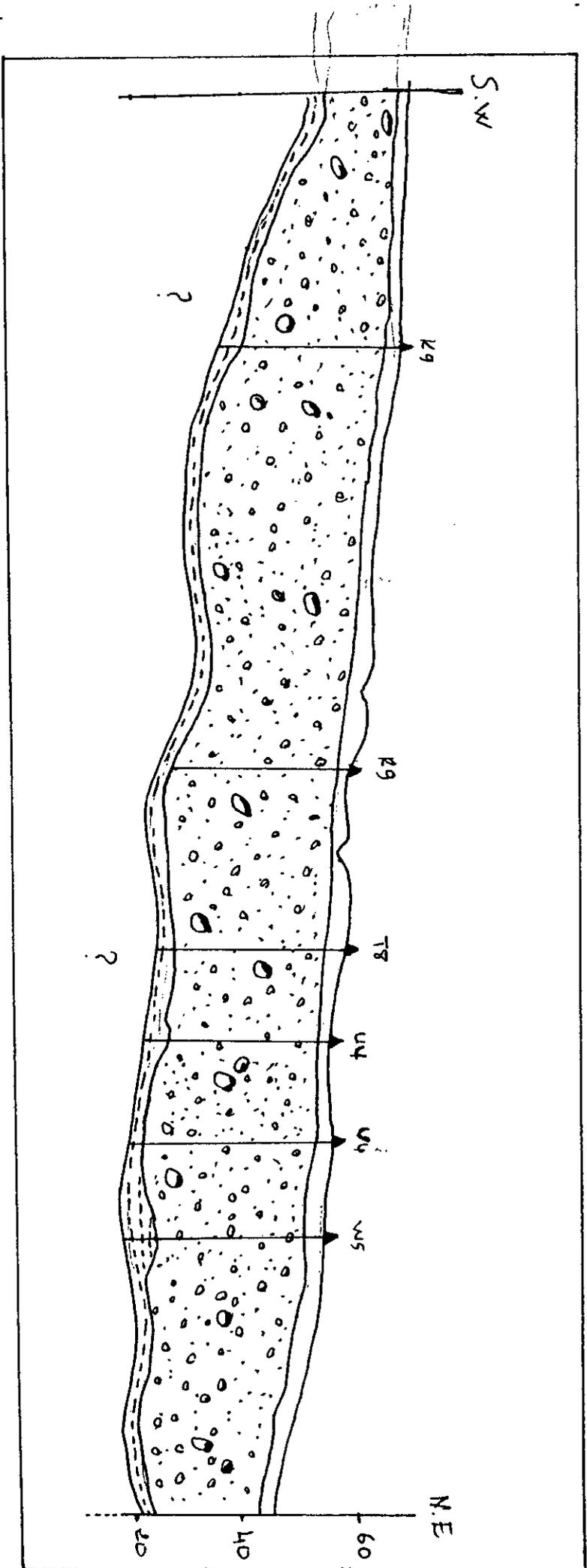


FIGURE: Coupe Géologique (B) Interpretative

V.2.2. Partie centrale (coupe c) : (fig.V.3)

La profondeur moyenne du mur des alluvions est de 35m, le substratum est argileux sur 10m et devient gréseux. Pour ce qui est du remplissage, nous avons défini deux niveaux grossiers intercalés chaque fois par des bancs argileux ou des sables fins à matrice argileuse.

Dans cette partie centrale, et en allant vers le sud, nous remarquerons que le substratum s'approfondit et le niveau argileux s'épaissit au détriment des alluvions grossières.

Plus au sud, sur les rives de la vallée, le remplissage alluvionnaire s'amincit.

En résumé pour cette partie centrale, entre Amizour et o Ghir, nous remarquons que :

- Le remplissage s'amincit du Nord vers le Sud et est maximum au centre de la région d'El Kseur ;
- Les alluvions sont très hétérogènes et passe de niveaux à galets grossiers à un niveau sableux et puis des graviers et gravillons ;
- Existence de pochettes aquifère vers l'Ouest en plein milieu de niveaux argileux (lentilles de graviers/gravillons.

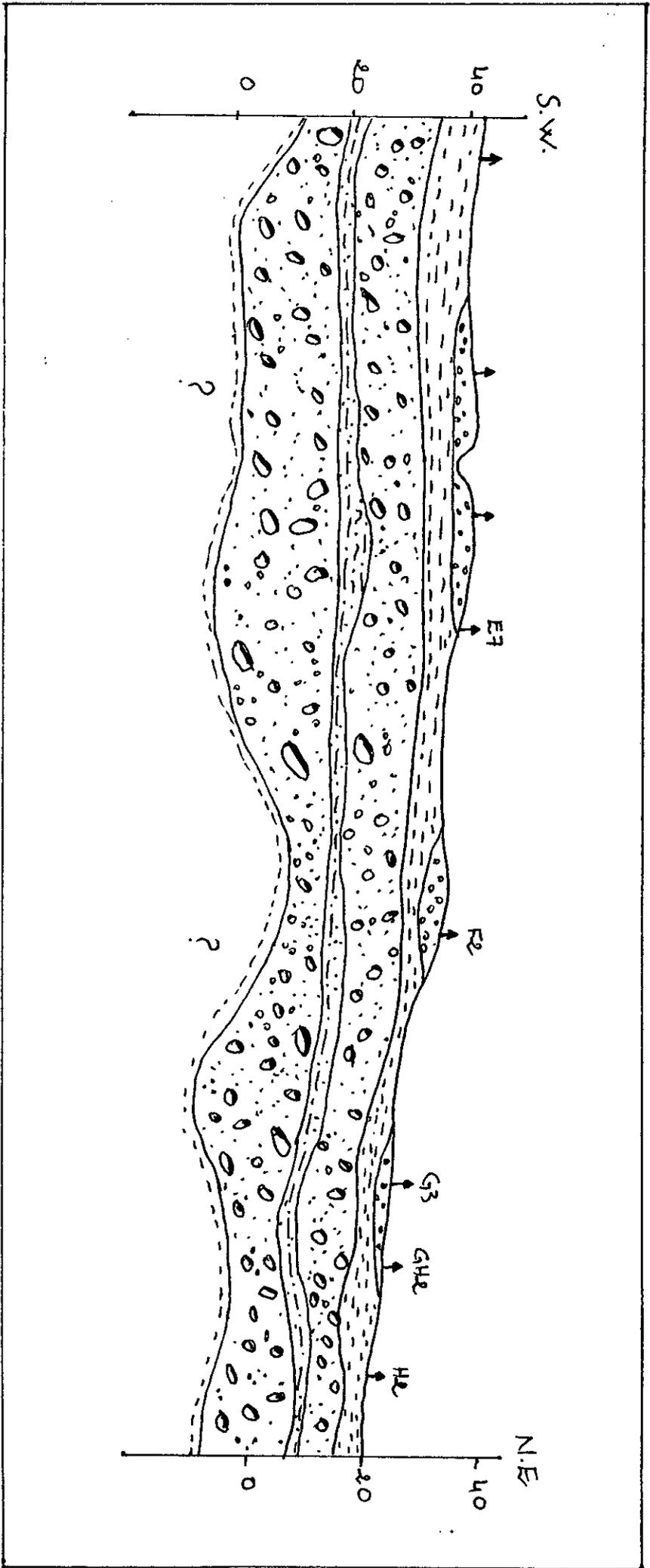


Fig. 03: Coupe Géoelectrique (C) interprétative.

V.2.3. Partie avale(coupe D) : (fig.V.4)

Cette coupe montre deux niveaux litlarstratiques distincte

- Un niveau argileux avec lentille de gravier /galet ;
- Un niveau beaucoup plus profond comprenant des formations grossières et sables.

Notons néanmoins l'existence d'une couche superficielle ne dépassant guère les cinq mètres essentiellement formés de gravillon et sables fins.

D'autre part le forage de Tela Hamza (1248-E9) de coordonnées Lambert, longitude X=707.250 et latitude Y=380.350 situé en rive droite de la Soumam en Nord Ouest du village Millala.

Ce forage d'une profondeur de 250 mètres de haut en bas les formations suivantes :

- De 0 à 19 m : Argile sableuse brun clair avec petit gravier siliceux ;
- De 19 à 50 m : Argile sableuse grise avec gravier siliceux aux sommets et petits galets gréseux ou de roches éruptives à la base ;
- De 50 à 57 m : Gros galets quartzeux et roches éruptives dans des argiles sableuses ;
- De 57 à 70 m : Argile grise avec gravier ;
- De 70 à 125 m : Argile grise à microfaune néocène ;
- De 125 à 129 m : Sable fin jaunâtre argileux ;
- De 129 à 148 m : Fragments non roulés de grés gris foncé ou brun ;
- De 148 à 150 m : Gris fin à ciment calcaire.

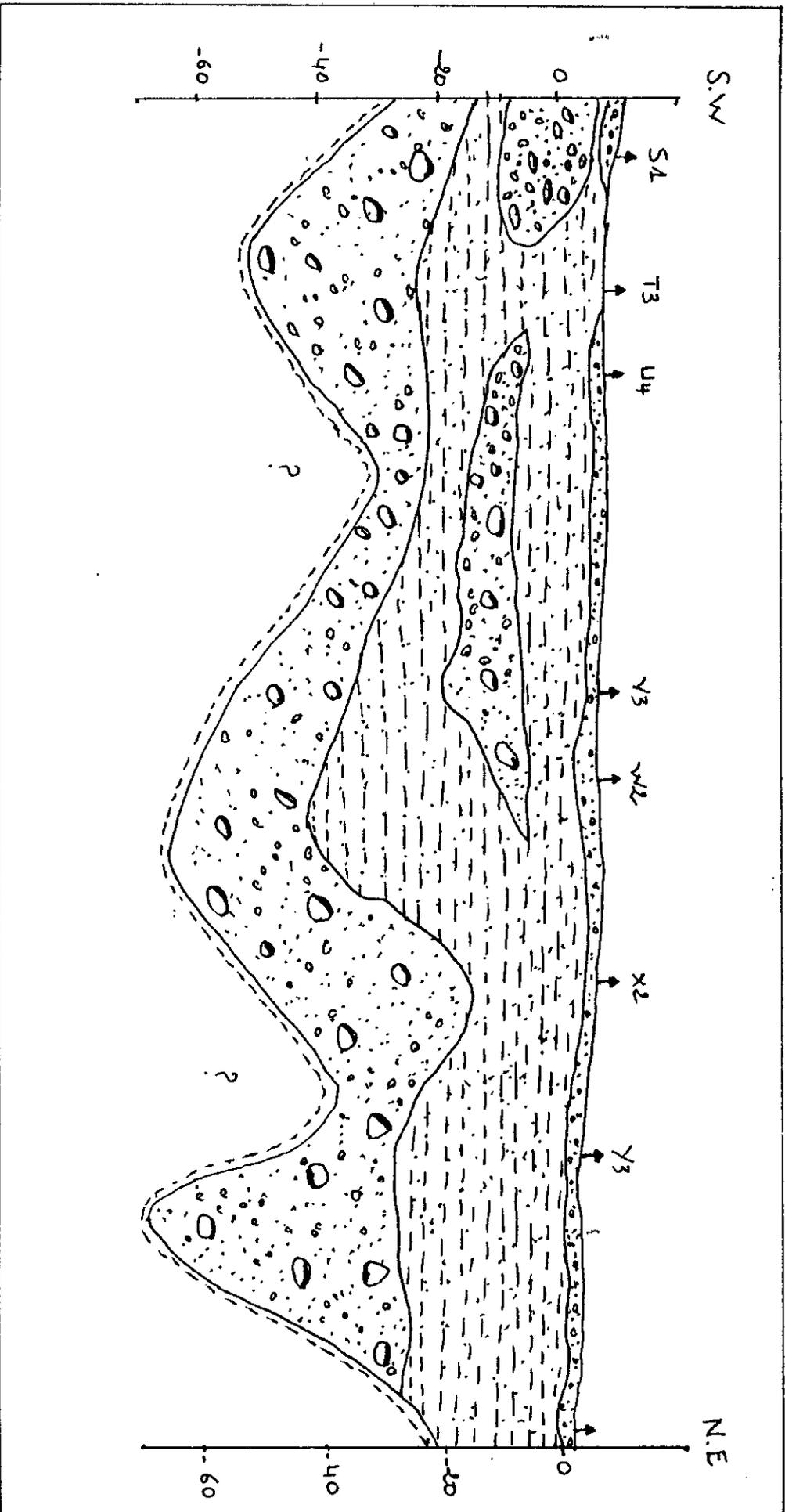


Figure 4 : Coupe Géoelectriques (D) interprétative.

V.3. Extension des alluvions et volume du réservoir :

D'après les coupes hydrogéologiques, les alluvions forment une bande continue de Sidi Aich à la mer, d'une longueur de 35 à 37.5 Km et d'une largeur variable de 500 à 2500 m cette bande atteint son maximum à Roumilla, Ammassia et El Kseur.

La superficie couverte par ces alluvions est approximativement de 70 Km². Ces alluvions s'amincissent et s'approfondissent à partir de O. Ghir pour laisser la place à un recouvrement argileux assez puissant.

Pour le volume d'eau du réservoir aquifère, il a été estimé à environ 997 hm³ (C. Clincks 1973).

V.1.3. Carte du mur des alluvions :**a. Dans la partie amont :**

La vallée est beaucoup plus large et l'épaisseur des alluvions ne dépasse pas 20 à 25 m.

b. Dans la partie centrale :

Au niveau d'Aguellal, d'El Kseur et O. Ghir et après le resserrement d'Aguellal, la vallée devient longue et les alluvions atteignent leur maximum de 70 Km.

c. Dans la partie aval :

La vallée resserre progressivement et s'approfondit. Son allure devient relativement régulière et présente une forme en U et ce jusqu'à l'embouchure.

V.4. Caractéristiques hydrodynamiques :

Les caractéristiques hydrodynamiques de l'aquifère sont déterminées grâce à la relation d'essais de pompage de longue ou de courtes durées.

Au niveau de l'aquifère alluvial de la basse Soummam, quatre études ont été réalisées ; P. Linderg 1972, C. Clincks 1973, M. Zerrourou 1983 et M. Angler 1990.

V.4.1. Détermination des caractéristiques hydrodynamiques :

La détermination de la transmissivité (T) et du coefficient d'emmagasinement (S) est faite grâce à la méthode d'approximation de Jacob.

a. Méthode de Jacob (descente) :

Pour que cette méthode soit applicable il faut vérifier que $U < 10^{-2}$ tel que $U = \frac{r^2 s}{4Tt}$

Elle a pour équation :

$$\Delta = 0.183 \frac{Q}{T \log\left(\frac{2.25Tt}{r^2 s}\right)}$$

avec :

Δ : rabattement en mètre.

Q : débit de pompage constant dans l'ouvrage en m^3/s

T : transmissivité en m^2/s

t : temps de pompage est en seconde.

r : distance entre le piézomètre et l'axe du puits de pompage en m.

s : coefficient d'emménagement.

- Mode opératoire :

On porte sur un diagramme semi-logarithmique les temps de pompage en abscisses et le rabattement en ordonnées. La droite obtenue est de la forme $Y = a + bx$ a pour équation :

$$\Delta = \frac{0.183}{T} Q \left(\log \frac{2.25}{r^2 s} T + \log t \right)$$

Les valeurs de la transmissivité (T) sont données par l'accroissement du rabattement dans un cycle logarithmique, on obtient alors :

$$T = \frac{0.183}{C} Q \quad \text{et} \quad s = \frac{2.25Tt_0}{r^2}$$

Avec: C : cycle logarithmique

t_0 : temps de pompage pour un rabattement nul.

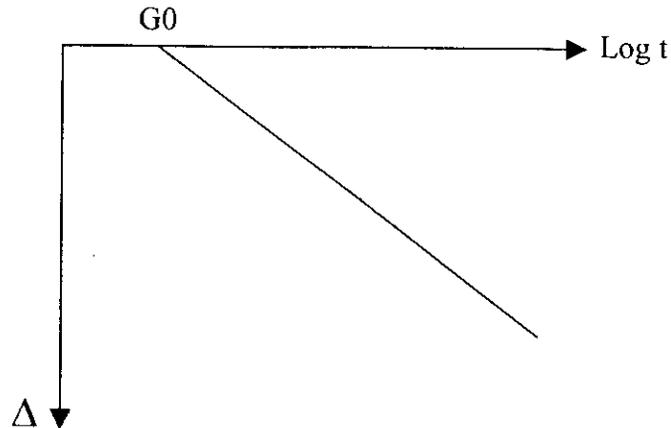


Figure.V.5 : courbe de descente

b . Méthode de Theis-Jacob (remonté) :

Après arrêt du pompage, le niveau d'eau remonte très vite (période post production) ainsi nous mesurons le rabattement résiduel qui représente la différence entre le niveau statique et le niveau mesuré à l'instant t' (temps écoulé depuis l'arrêt de pompage.

Le rabattement résiduel s'exprime comme suit :

$$\Delta_r = \frac{0.183}{T} Q \log\left(\frac{t+t'}{t}\right)$$

Δ_r : rabattement résiduel en mètre.

t' : temps écoulé depuis l'arrêt de pompage.

t : temps de puits le pompage.

Mode opératoire

On porte sur un diagramme semi-logarithmique, les rabattements résiduel (Δ_r) en ordonnée, et $\frac{t+t'}{t}$ en abscisse(Fig.22). Les points devraient s'aligner selon une droite moyenne, qui a pour pente:

$$c = 0.183 \frac{Q}{T} \text{ d'où } T = \frac{0.183}{c} Q$$

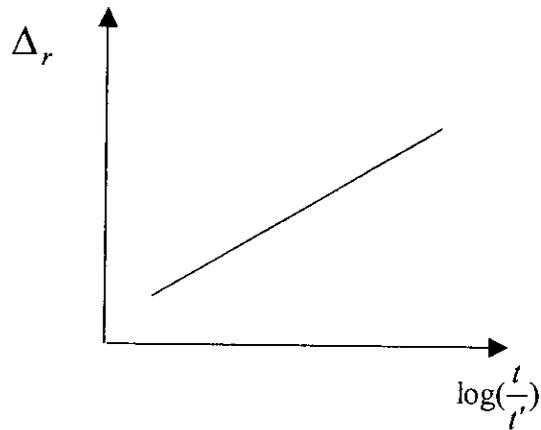


Figure.V.6: courbe de la remonté

Remarque :

On peut calculer (K) si on connaît l'épaisseur (e)

$$T = Ke \Rightarrow K = \frac{T}{e}$$

V. 5. Conclusion :

Les études hydrogéologiques et géophysique montrent un aquifère de remplissage alluvial très hétérogène constitue essentiellement de galets, de graviers, de sable et d'argiles. Il est caractérisé par deux types de nappes, une nappe libre a l'amont, et une nappe semi-captive à l'aval.

troisième partie

Analyse des données et interprétations

Chapitre VI

Analyse statistique des données

VI.1. Introduction:

Cette partie fait l'objet d'une analyse des données portant sur la perméabilité de l'aquifère de la basse vallée de la Soummam, ainsi que des épaisseurs du remplissage alluvial.

Cette analyse nous permet de faire une critique et mieux interpréter les résultats obtenus expérimentalement. Elle nous renseigne sur les moyennes, des écarts et de leurs adéquations.

VI.2. Acquisition et critique des données:

VI.2.1. La perméabilité:

La perméabilité est considérée parmi l'un des paramètres fondamentaux pour la caractérisation hydrodynamique de la nappe.

On peut définir la perméabilité comme le volume d'eau gravifique qui pércôle pendant l'unité de surface d'une section de terrain sous un gradient hydraulique égal à l'unité à la température 20°C (Castany.1982).

Dans notre étude, nous disposons de 48 points d'eau qui ont été fournis par l'ANRH d'Alger (Agence National Des Ressources Hydriques). Ces points sont répartis d'une façon irrégulière (fig.VI.1).

La perméabilité s'obtient généralement par essai de pompage interprété par une des méthodes analytiques les plus connues telles que les méthodes de Theise et Jacob qu'on a vu au chapitre V.

Pour rassurer la fiabilité des résultats, il faut disposer des valeurs de la perméabilité et procéder à l'analyse à l'aide des différentes méthodes d'interprétation et des essais de pompages.

Malheureusement et malgré nos efforts et contacts au niveau de l'ANRH, nous n'avons pas pu d'avoir ces données.

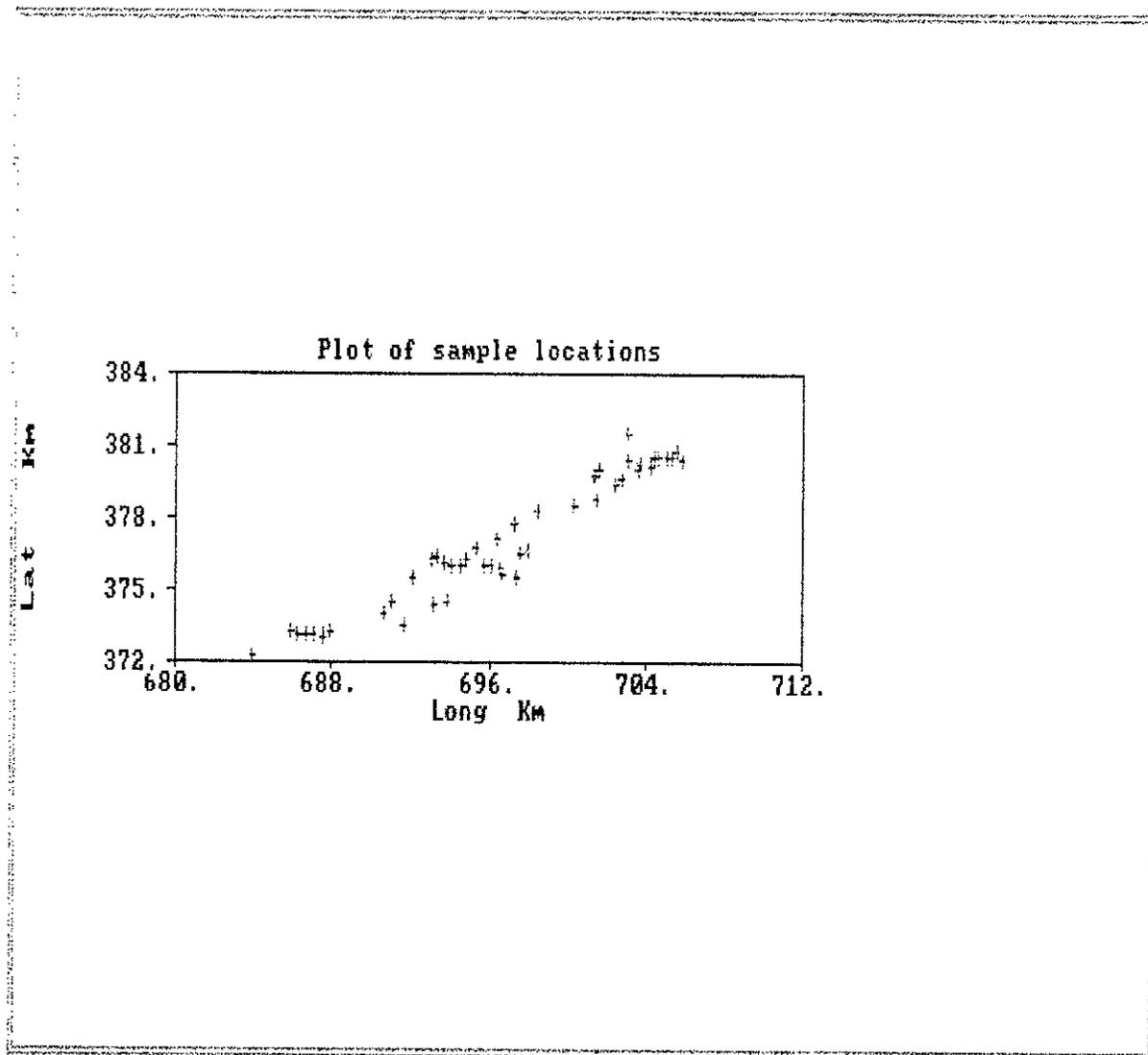


Figure.VI.1:Distribution spatiale des perméabilités (K)

VI.2.2. l'épaisseur:

Dans notre étude nous avons analysé les épaisseurs remplissage alluvionnaire. Nous avons prélevé 68 points de mesure. Ces derniers proviennent des sondages hydrogéologiques effectués par la Compagnie Géophysique Générale (CGG) en 1970.

Ces points sont répartis d'une façon aléatoire sur toute la plaine de la basse Soummam (fig.VI.2).

Certaines critiques peuvent être dites sur les valeurs de ces données, comme:

- La possibilité que certains forages n'ont pas pu atteindre la formation du substratum imperméable ;
- Par fois, on peut rencontrer des déformations argileuses dans le remplissage ;
- Alluvionnaire, c'est à dire la possibilité de l'existence des couches imperméable ;
- Il existe des zones où on ne peut pas différencier entre les alluvions et du miocène comme dans le cas de la région intermédiaire.

VI.3. Représentation des données:**VI.3.1. La perméabilité:**

Comme on l'on a indiqué, on 48 points de mesure qui couvrent l'ensemble de la zone.

On constate qu'il y a des variabilités dans les valeurs de perméabilité ce qui explique l'hétérogénéité du terrain aquifère.

VI.13.2. L'épaisseur:

Nous avons 68 forages répartis sur toute la plaine de la basse Soummam. D'après ces données, nous constatons qu'il est difficile de déterminer les épaisseurs avec précision dans les zones intermédiaires.

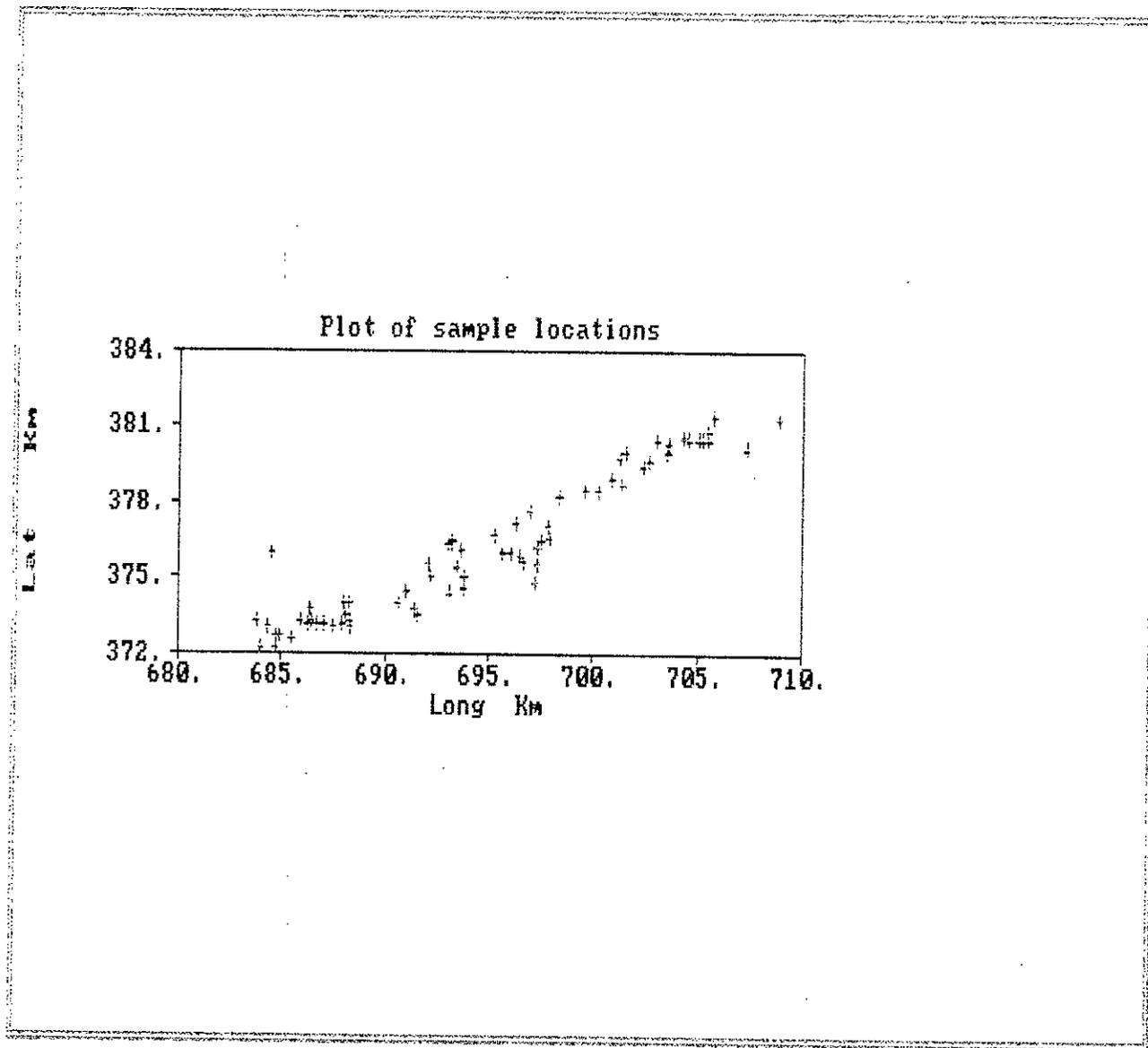


Figure.VI.2:Distribution spatiale des épaisseurs (e)

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

- **La variance:**

Elle est donnée par la formule suivante:

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

- **L'écart type:**

Désigné par σ est donné comme suit:

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

- **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.

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

VI.4.3. paramètre de forme:

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

Ils existent deux paramètres de forme:

a. Coefficient d'asymétrie Skewness:

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

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

- Si Skewness < 0 : nous sommes dans le cas de l'asymétrie nulle c'est à dire que notre courbe est symétrique;
- Si Skewness > 0: nous sommes dans le cas d'asymétrie positive et notre courbe sera décalée vers la droite;

- Si $Skewness < 0$: c'est l'asymétrie négative et la courbe sera décalée vers la gauche.

b. Coefficient d'aplatissement:

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

VI.5. 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 la loi normale et Log normale sont souvent traitées.

Selon la bibliographie (Voltz, Gastruc-odoux), les paramètres hydrodynamiques telle que la perméabilité (K) suit une loi Log normale, alors que les paramètres structuraux des nappes telle que l'épaisseur suit une loi normale.

Les histogrammes ainsi que les diagrammes représentant k et e en fonction de leurs fréquences cumulées sont établis par le logiciel GEO-EAS.

Ces graphes sont représentés grâce aux: (fig.VI.3), (fig.VI.4), (fig.VI.5) et (fig.VI.6).

Les différents paramètres statistiques des perméabilités (K) et des épaisseurs (e), figurent dans le tableau n°2.

Tableau n°2: paramètres statistiques élémentaires des données

| Variable | Perméabilité (K) | Epaisseur (e) |
|---------------------------|------------------|---------------|
| Paramètres statistiques | | |
| Taille | 48 | 68 |
| Min | $2.65.10^{-5}$ | 8.00 |
| Max | $1.35.10^{-2}$ | 60.00 |
| Etendue | 0.0134735 | 52.00 |
| Moyenne | 0.0018 | 27.78 |
| Coeff. de var ($C_v\%$) | 124.38 | .5945 |
| Médiane | 0.0012 | 24.65 |
| Variance | 0.000 | 139.99 |
| 1 ^{er} quantile | 0.0004 | 18.10 |
| 3 ^{ème} quantile | 0.0135 | 37.20 |
| Ecart-type | 0.0023 | 139.99 |
| Skewness | 3.15 | 0.61 |
| Kurtosis | 15.79 | 2.84 |

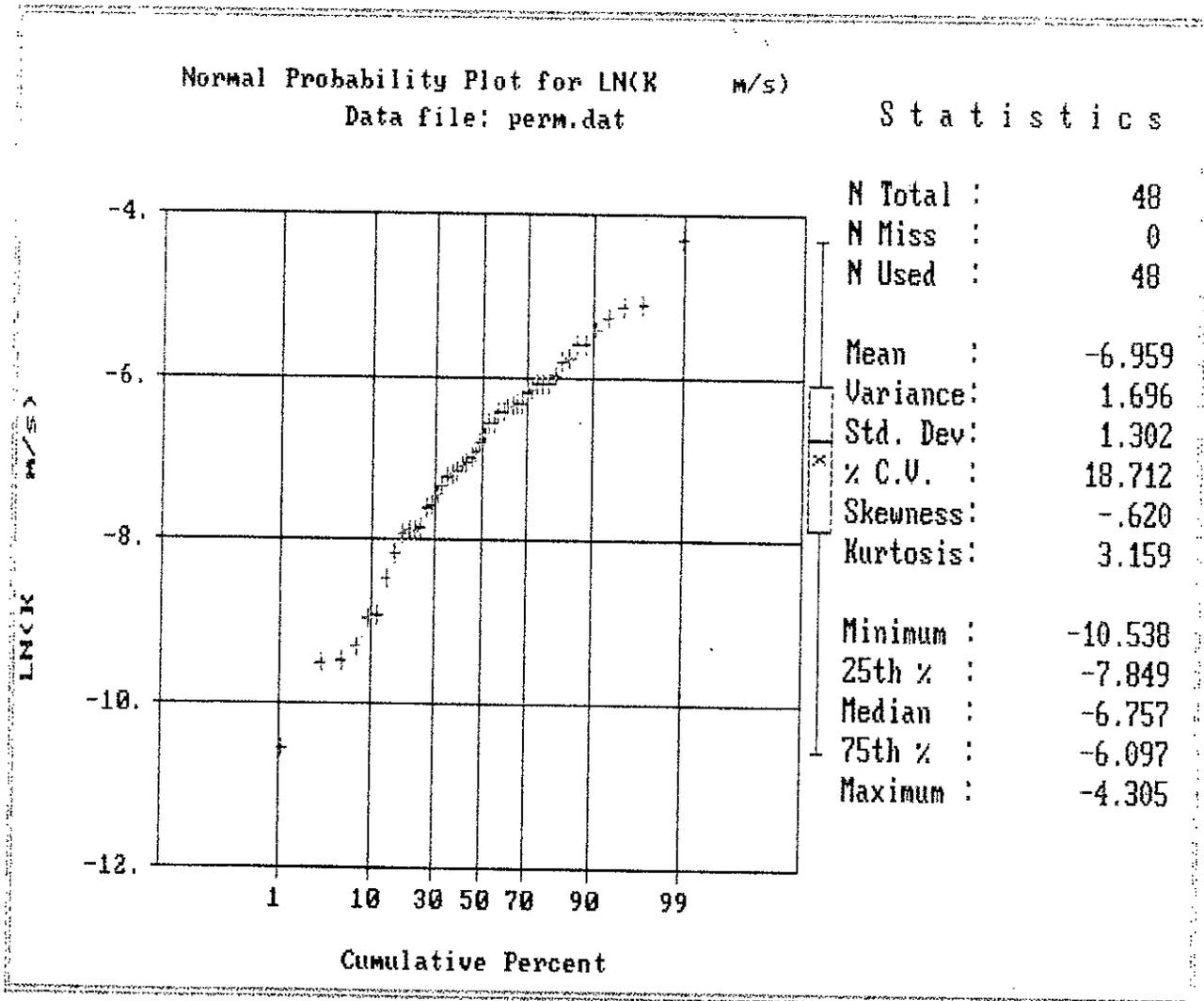


Figure.VI.3: Diagramme d'ajustement de perméabilités (K)

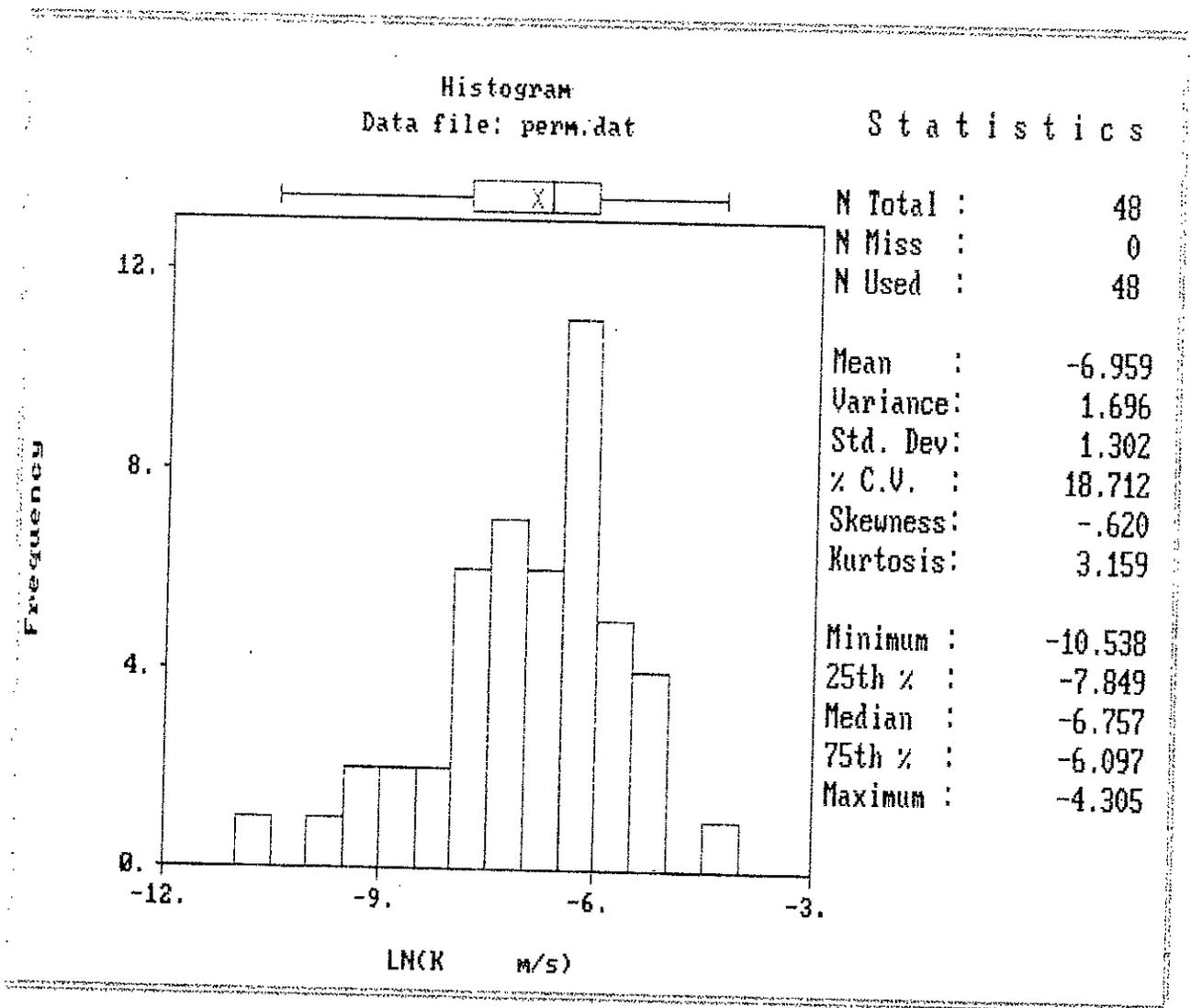


Figure.VI.4: Histogramme des perméabilité (K)

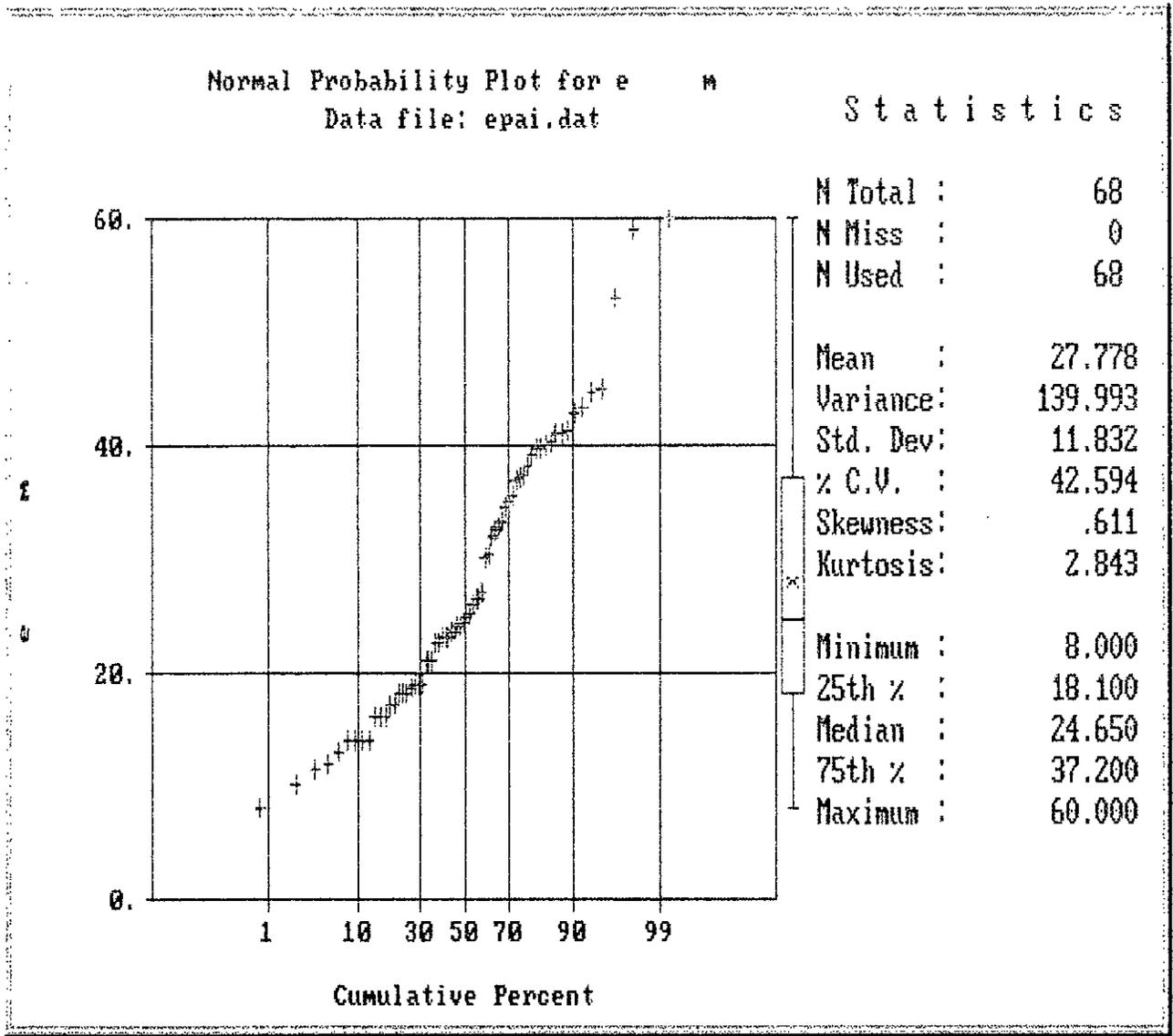


Figure.VI.5:Diagramme d'ajustement des épaisseurs

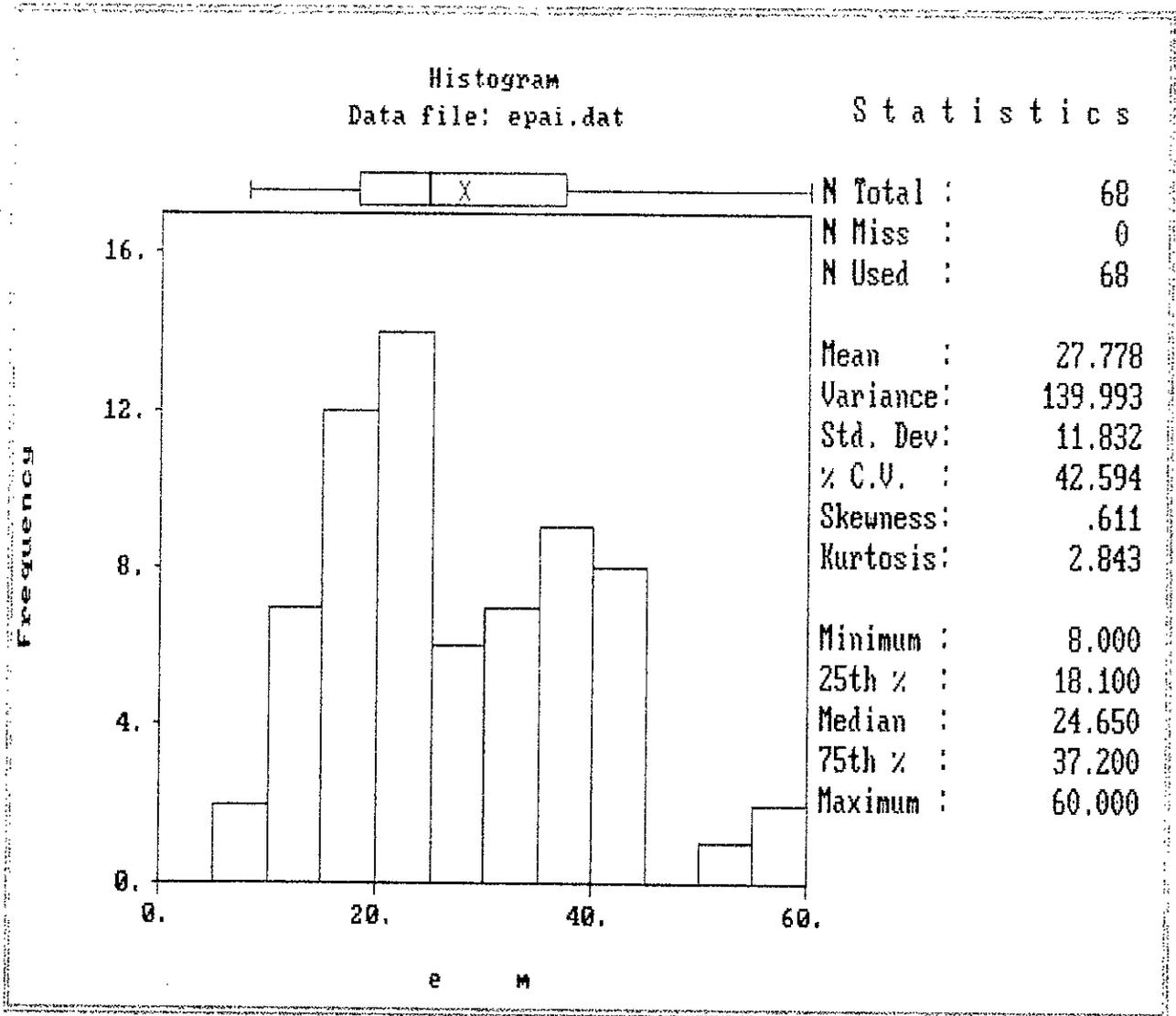


Figure.VI.6: Histogramme des épaisseurs(e)

VI.6. Interprétation:

D'après les résultats du tableau n°2 on peut constater que :

- Les valeurs minimales et maximales sont très éloignées l'une de l'autre pour les deux paramètres, ce qui indique une étendue importante. Selon Castany, 1982. La valeur minimale de K est égale à $2,65 \cdot 10^{-5}$ m/s elle correspond à un degré de perméabilité mauvais, alors pour la valeur maximale qui est de l'ordre de $1,35 \cdot 10^{-2}$ m/s à un degré très bon degré de perméabilité.
- La moyenne de la perméabilité correspond de un bon degré de perméabilité, c'est à dire que le sol est moyennement perméable
- Les coefficients d'asymétrie (Skewness) sont positifs, ce qui indique que les dispersions sont étirées vers la droite et cela se confirme avec les formes des histogrammes.
- Le coefficient d'aplatissement (Kurtosis) est positif, ce qui traduit une forte concentration des données.
- Nous remarquons que le coefficient de variation dépasse 100% pour K et inférieur à 50% pour l'épaisseur alors la loi de distribution de la perméabilité est logarithmique tandis celle de l'épaisseur est normale.
- Pour les perméabilités, les valeurs du premier quantile indique 25% des échantillons sont inférieures à 0.0004 m/s telle que celles du troisième quantile indique que 75% des valeurs de l'échantillon sont inférieures à 0.0135 m/s. Pour les épaisseurs le premier quantile contient 25% des valeurs inférieures à 18.10 m et le troisième contient 75% qui sont inférieures à 37.20m.

Chapitre VII
Etude géostatistique

VII.1. Introduction :

L'analyse géostatistique des variables de perméabilité (K) et l'épaisseur (e) de l'aquifère alluvionnaire de la basse vallée de la Soummam a été réalisée par le logiciel GEO-EAS (England et Soarksa, 1988). Ce logiciel comprend plusieurs tâches.

VII.2. Prévariogramme:

La construction des couples est réalisée par ce programme. Il donne les classes et la distance moyenne de chacune d'elles. 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 la perméabilité, on a trouvé 943 couples et pour l'épaisseur 1446 couples.

VII.3. Variographie:

L'étude de l'analyse structurale depuis la construction du variogramme jusqu'à sa modélisation et sa validation est assurée par le logiciel GEO-EAS.

Ce logiciel est bien décrit dans la thèse d'ingénieur réalisé par AMIRI et IDER (1998).

Ce programme est destiné au traitement géostatistique et comprend plusieurs modules en options qui ont des fonctions différentes depuis l'introduction et la préparation des fichiers de données jusqu'au krigeage et le tracé de la carte.

VII.4. Construction du variogramme:

En utilisant les coordonnées Lambert, longitude X en km et latitude Y en km, le prévariogramme établit le fichier PCF qui est nécessaire pour construire le variogramme expérimental correspondant. Ce même fichier PCF va être utilisé par l'option VARIO, pour la construction du variogramme et sa validation.

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

Le calcul du variogramme est considéré rigoureux généralement pour une classe possédant de 50 couples (B.Khammari 1990; in Azouzi, 1993).

VII.4.1. Variogramme de la perméabilité (K):

Le variogramme expérimental a été calculé à partir des données brutes de la perméabilité (K).

En choisissant un pas de 1 km, et une distance de 12.5 km correspondant à la demi-distance séparant les points les plus éloignés.

Nous obtenons 13 classes (tableau n°1).

Tableau n°1: résultats du variogramme expérimental pour les perméabilités

| Nombre de Classe | Nombre de couples | Distance moyenne | $\gamma_1(h)$ |
|------------------|-------------------|------------------|---------------|
| 1 | 60 | 0.605 | 1.158 |
| 2 | 115 | 1.482 | 1.258 |
| 3 | 94 | 2.441 | 1.142 |
| 4 | 82 | 3.435 | 1.134 |
| 5 | 72 | 4.469 | 1.219 |
| 6 | 57 | 5.525 | 1.016 |
| 7 | 65 | 6.534 | 1.386 |
| 8 | 74 | 7.502 | 1.846 |
| 9 | 75 | 8.519 | 1.961 |
| 10 | 76 | 9.429 | 1.824 |
| 11 | 71 | 10.474 | 2.283 |
| 12 | 56 | 11.471 | 2.772 |
| 13 | 46 | 12.441 | 2.397 |

VII.4.2. Variogramme de l'épaisseur (e):

Pour les épaisseurs on a utilisé un pas de 0.8 km et une distance de 10 km, il en résulte 13 classes (tableau n°2).

Tableau n°2: résultats du variogramme de l'épaisseur (e)

| Nombre de classes | Nombre de couples | Distance moyenne | $\gamma_1(h)$ |
|-------------------|-------------------|------------------|---------------|
| 1 | 77 | 0.512 | 45.730 |
| 2 | 141 | 1.193 | 110.292 |
| 3 | 143 | 1.973 | 148.163 |
| 4 | 117 | 2.812 | 132.595 |
| 5 | 126 | 3.573 | 129.788 |
| 6 | 127 | 4.395 | 146.596 |
| 7 | 94 | 5.225 | 123.024 |
| 8 | 109 | 5.972 | 169.377 |
| 9 | 92 | 6.785 | 128.956 |
| 10 | 99 | 7.585 | 129.237 |
| 11 | 100 | 8.424 | 156.247 |
| 12 | 114 | 9.241 | 156.484 |
| 13 | 107 | 9.992 | 148.365 |

VII.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, pépite et portée). Ce modèle serait rejeté ou accepté selon les résultats de l'XVALID.

Pour la perméabilité, nous constatons le modèle le mieux adapté est le modèle gaussique avec un effet pépite de 1.1 m^2 , une portée de 15 km^2 et un palier de 1.5 m^2 .

Pour les épaisseurs nous avons adopté au modèle exponentiel avec un palier de 150 m^2 , une pépite de 0 m^2 et une portée de 3 km (tableau n°3).

Tableau n°3: paramètres des variogrammes

| Variable | Type | Pépite | Portée | Palier |
|-----------------|-------------|--------|--------|--------|
| Perméabilité(K) | gaussique | 1.1 | 15 | 1.5 |
| Épaisseur (e) | exponentiel | 0 | 3 | 150 |

Les variogrammes des deux variables sont représentés selon la figure VII.1 et la figure VII.2.

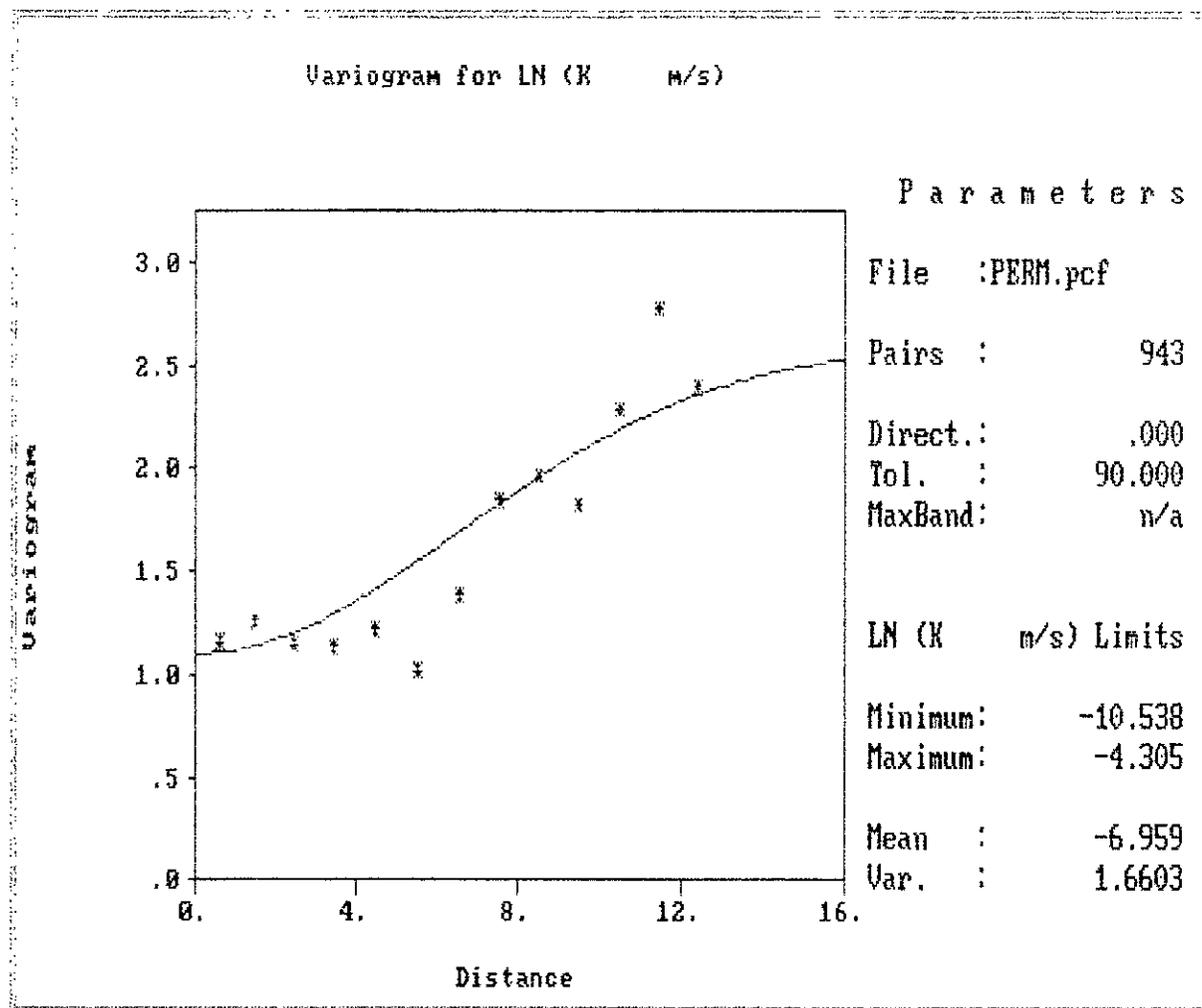


Figure.VII.1: Variogramme logarithmiques des perméabilités (K)

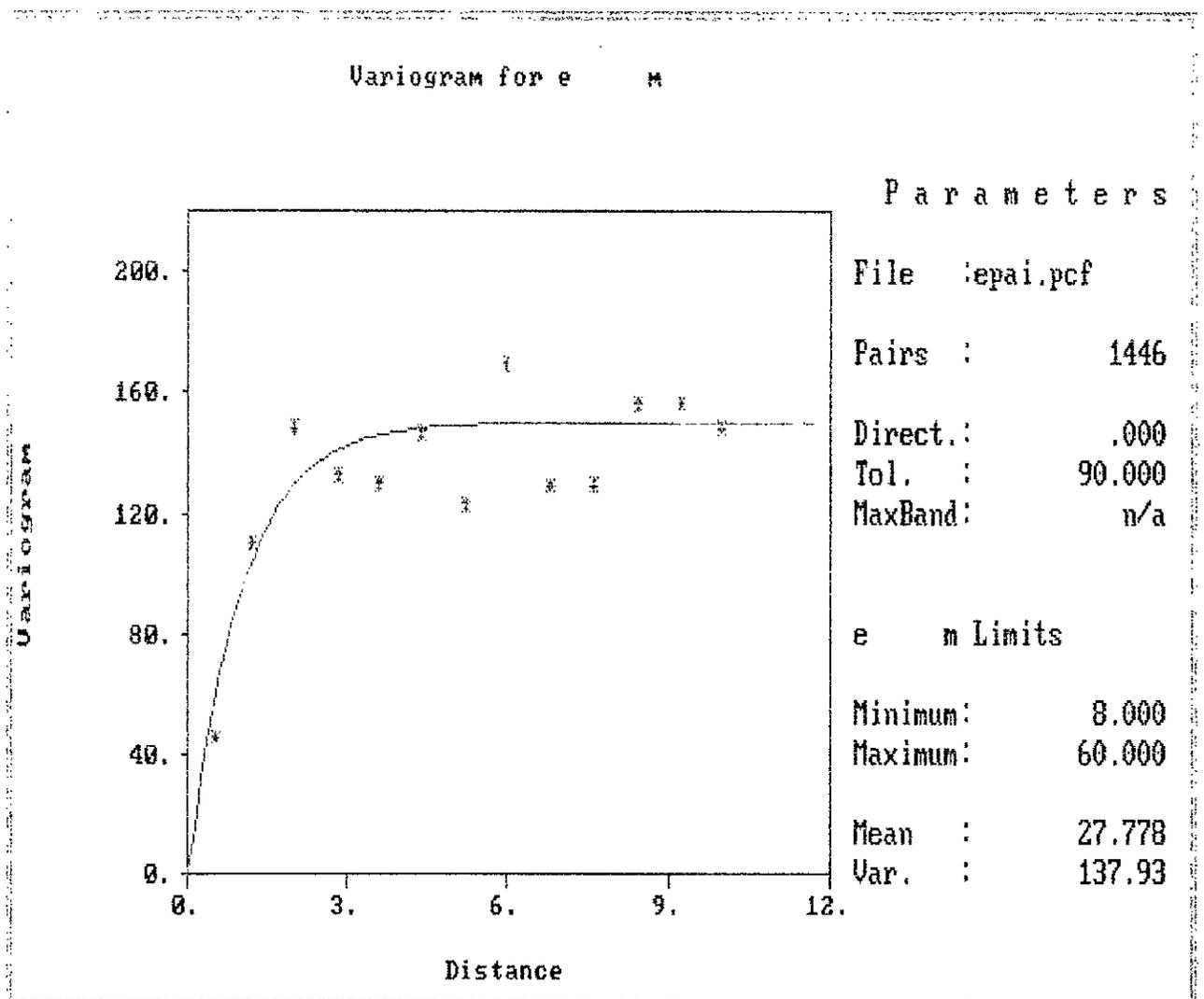


Figure.VII.2: Variogramme des épaisseurs

VII.5. Validation du variogramme

XVALID est une option du programme GEO-EAS qui permet le test de validation croisée du modèle choisit en estimant par le krigeage les valeurs mesurées par le test de deux indices à savoir:

- La moyenne des écarts $m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Z_i - Z_i^*)$ qui doit tendre vers zéro pour vérifier qu'il n'y a pas de biais systématique.
- La moyenne des écarts quadratiques rapportés à l'écart type du krigeage doit tendre vers l'unité pour vérifier que les erreurs des krigeage sont cohérentes avec la variance calculée:

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

Pour nos valeurs nous remarquons que les résultats obtenus sont très proches aux normes préconisées par le krigeage (tableau n°4).

Tableau n°4: résultats de l'option XVALID

| Variable | Moyenne des écarts | Moyenne quadratiques des écarts |
|------------------|--------------------|---------------------------------|
| Perméabilité (K) | 0.001 | 1.037 |
| Epaisseur (e) | 0.029 | 0.952 |

En plus de la validation, l'XVALID permet de réaliser les cartes d'erreurs.

On distingue deux symboles sur ces cartes, le symbole (+) correspond aux valeurs surestimées, et le signe (X) correspond aux valeurs sous estimées, et la taille de l'erreur est proportionnelle à celle du symbole.

VII.6. Interprétation des cartes d'erreurs:**VII.6.1. Cartes d'erreurs logarithmiques de la perméabilité (z^+ - lnk):**

Selon la carte représentée dans la figure VII.3, nous remarquons que les erreurs sont moins importantes sur l'ensemble de la plaine à part certains points surtout dans la zone amont où une valeur est surestimée et une autre sous estimée sur la partie centrale.

Cela peut être expliqué pour le manque d'échantillonnage surtout pour la zone amont ou la mauvaise distribution pour l'ensemble de la plaine.

Ces erreurs sont représentées également sous forme d'histogramme d'erreurs réduites d'estimation (fig.VII.4) et nous constatons que la distribution des erreurs suit une loi normale.

Ces erreurs tendent vers 0 pour la majorité des points ce qui valide notre estimation.

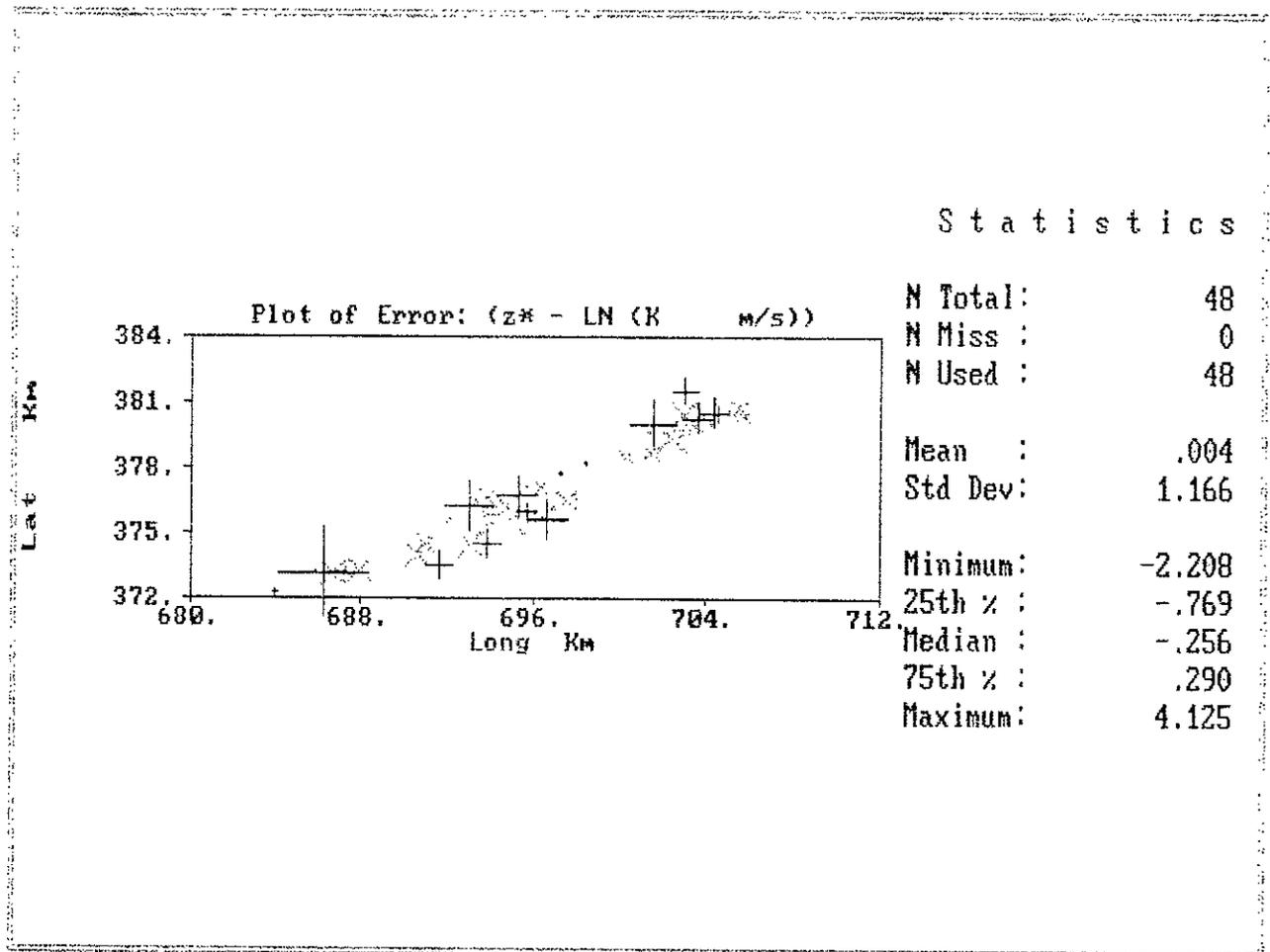


Figure.VII.3: carte d'erreurs logarithmiques des perméabilités

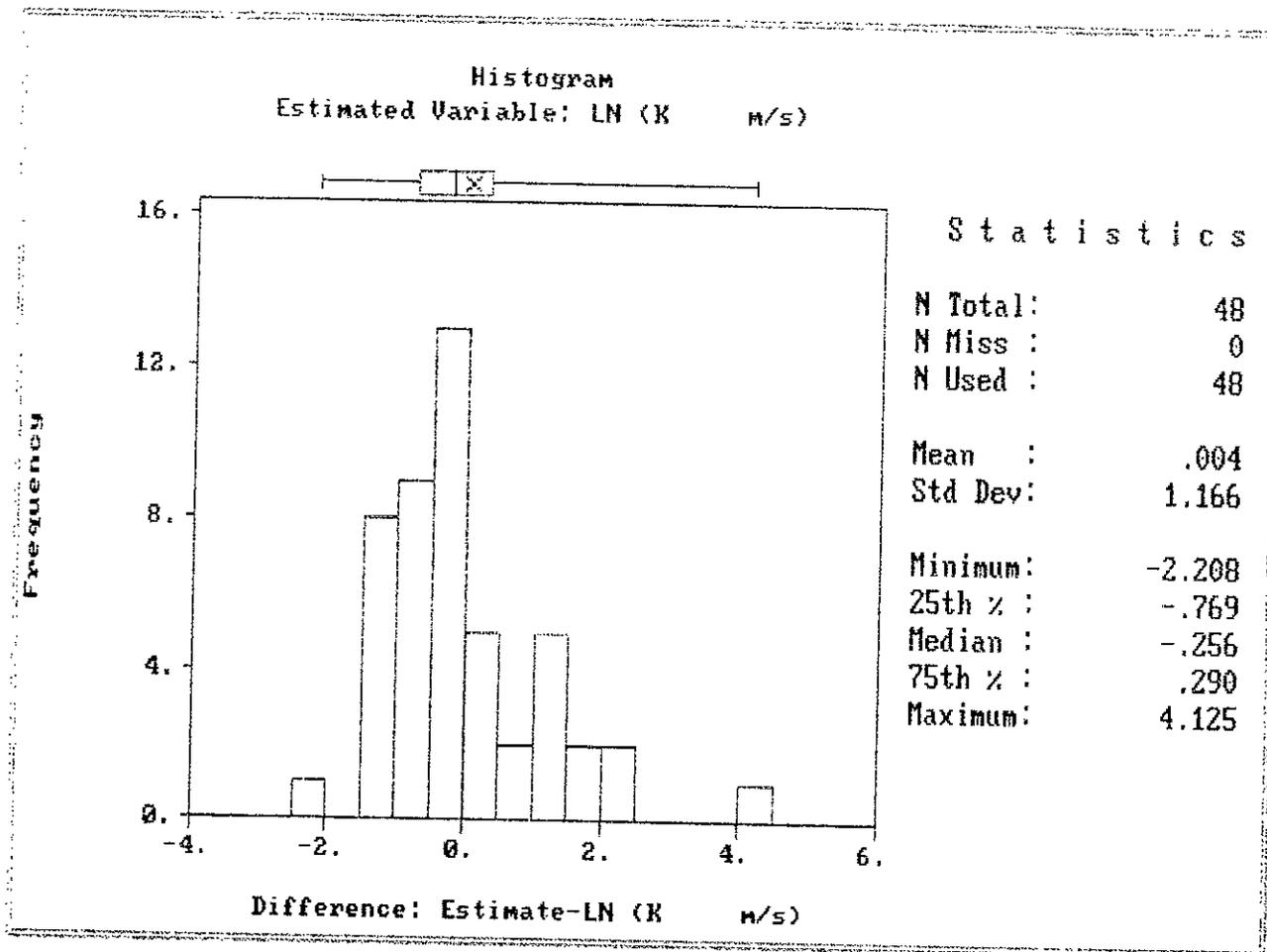


Figure.VII.4. Histogramme d'erreurs logarithmiques des perméabilités

VII.6.2. carte d'erreurs des épaisseurs ($z^* - e$):

Nous remarquons selon (fig.VII.5) Que l'erreur est importante dans la partie centrale et la partie amont.

Le peuvent être attribuées aux, d'une part aux difficultés de distinction entre les alluvions et les miocènes comme nous l'avons indiqué dans le chapitre V (cadre hydrogéologique) et d'autre part par les forages incomplets qui n'atteignent pas le substratum. Ce qui influe sur la fiabilité des données.

L'histogramme des erreurs (fig.VII.6) montre que la distribution est normale, ce qui signifie que la qualité de l'estimation est bonne.

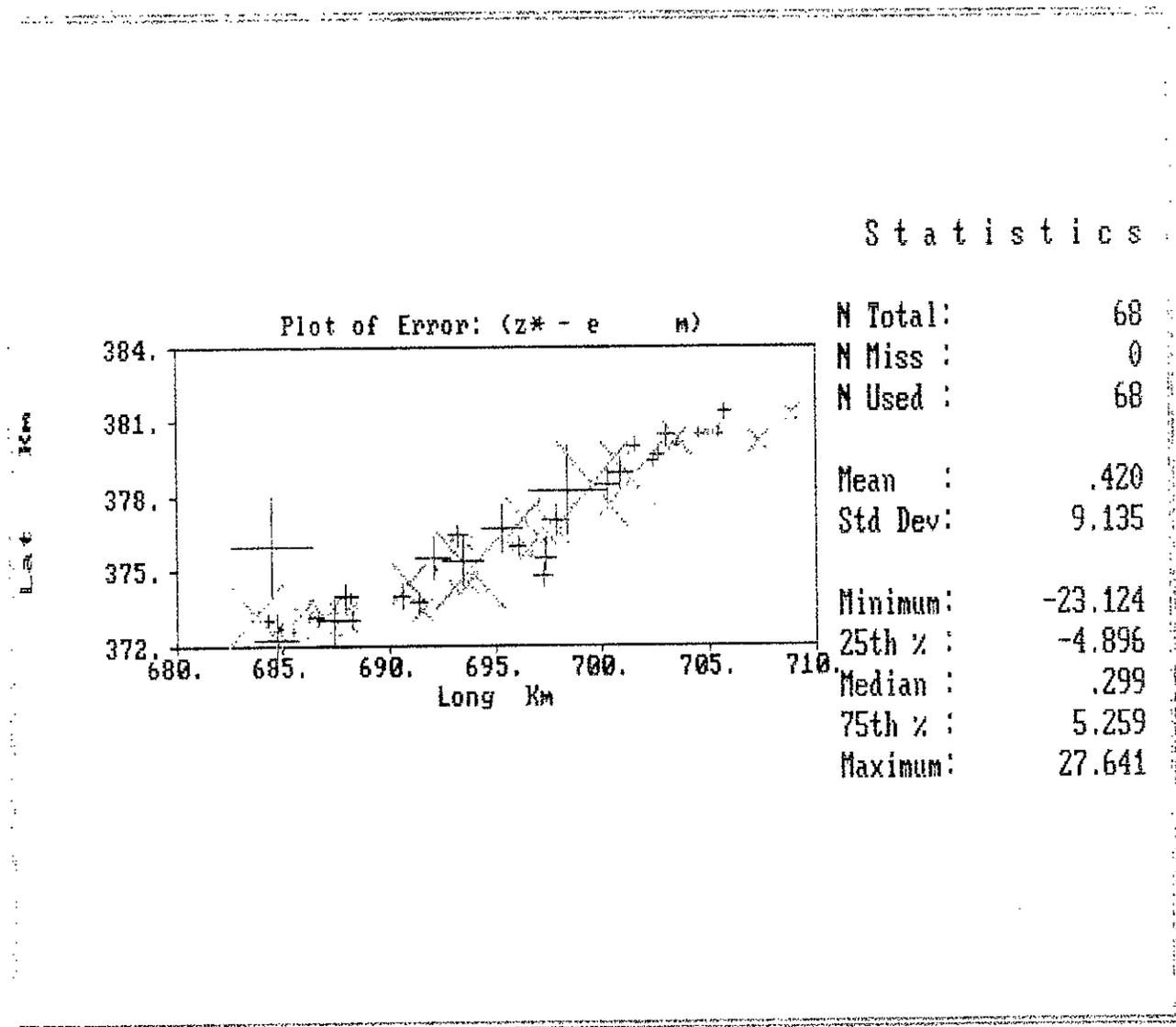


Figure.VII.5: Carte d'erreurs des épaisseurs (e)

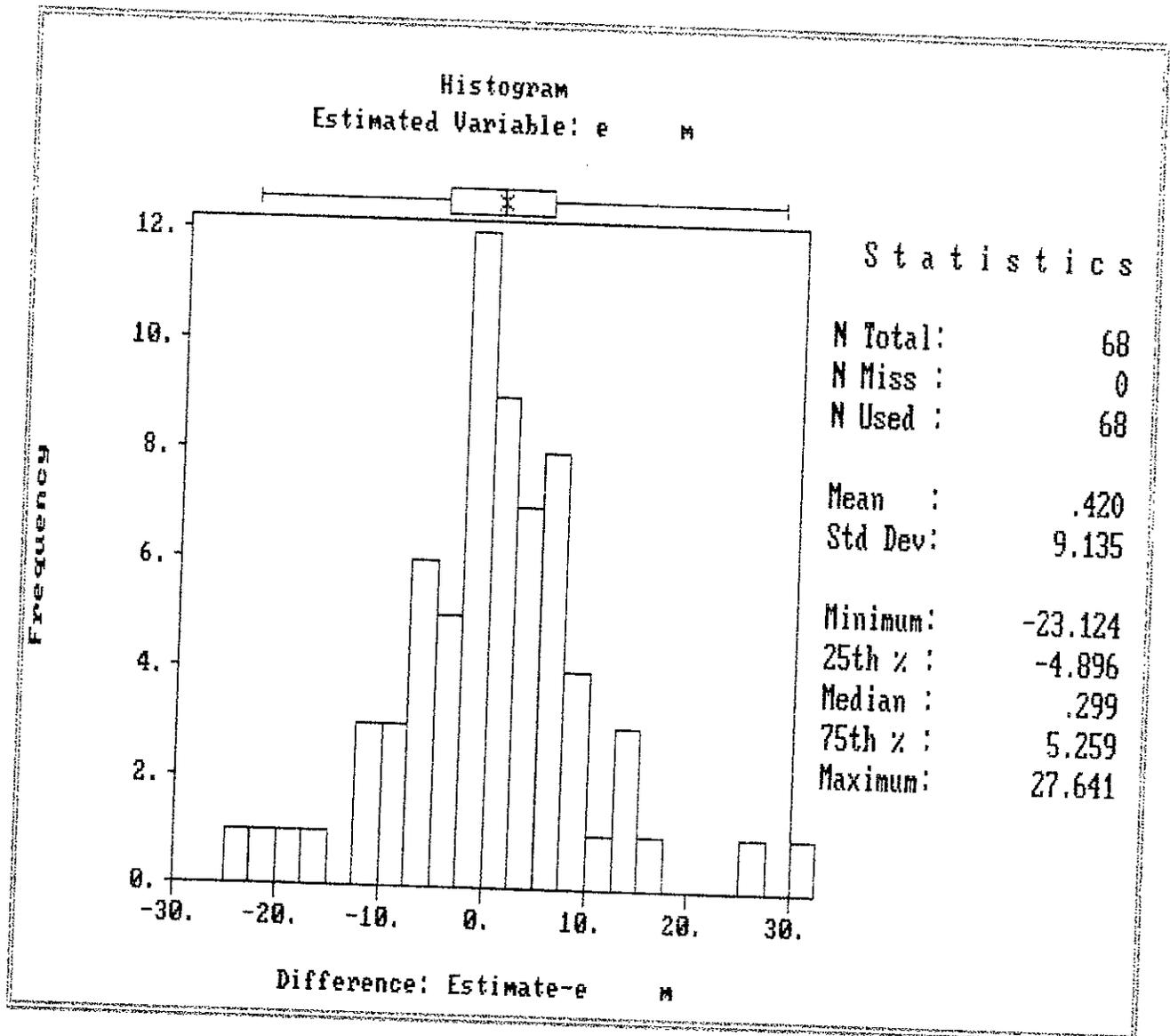


Figure.VII.6: Histogramme des erreurs des épaisseurs (e)

VII.8. Interprétation des cartes krigées:

VII.8.1. Carte krigée des Ln (k):

Après le choix et la validation des différentes structures de k , nous passons à l'étape du krigeage où la carte krigée et le bloc de diagramme des logarithmes de la perméabilité seront établies (fig. VII.7 et fig. VII.8).

La carte krigée de la perméabilité que montre que les valeurs sont importantes dans la zone amont puis se diminuer en approchant de plus en plus vers l'aval.

On peut expliquer cette variabilité par le phénomène de transport solide par les cours d'eau qui coulent s en direction de la mer.

Les solides et surtout les matériaux fin comme les argiles se disposent en arrivant à l'aval ce qui entraîne une diminution sur la perméabilité du matériau.

La carte montre aussi que le terrain est anisotrope cette anisotropie est due à l'existence d'un sens privilégié, dirigé du Nord Vers l'Est.

VII.8.2. carte krigée des épaisseurs (e):

Nous remarquons d'après la carte krigée le bloc diagramme des épaisseurs (fig. VII.9 et fig. VII.10), l'hétérogénéité des profondeurs alluvionnaires, où le maximum des épaisseurs sur l'axe de la vallée et le minimum aux extrémités.

Cela se confirme avec les résultats prélevés par les sondages géophysiques où les remplissages alluvionnaires sont variables et le substratum atteint ces profondeurs maximales dans la partie centrale.

On peut expliquer, cette variabilité des épaisseurs aux déformations géologiques que subit la région jusqu'à l'heure actuelle.

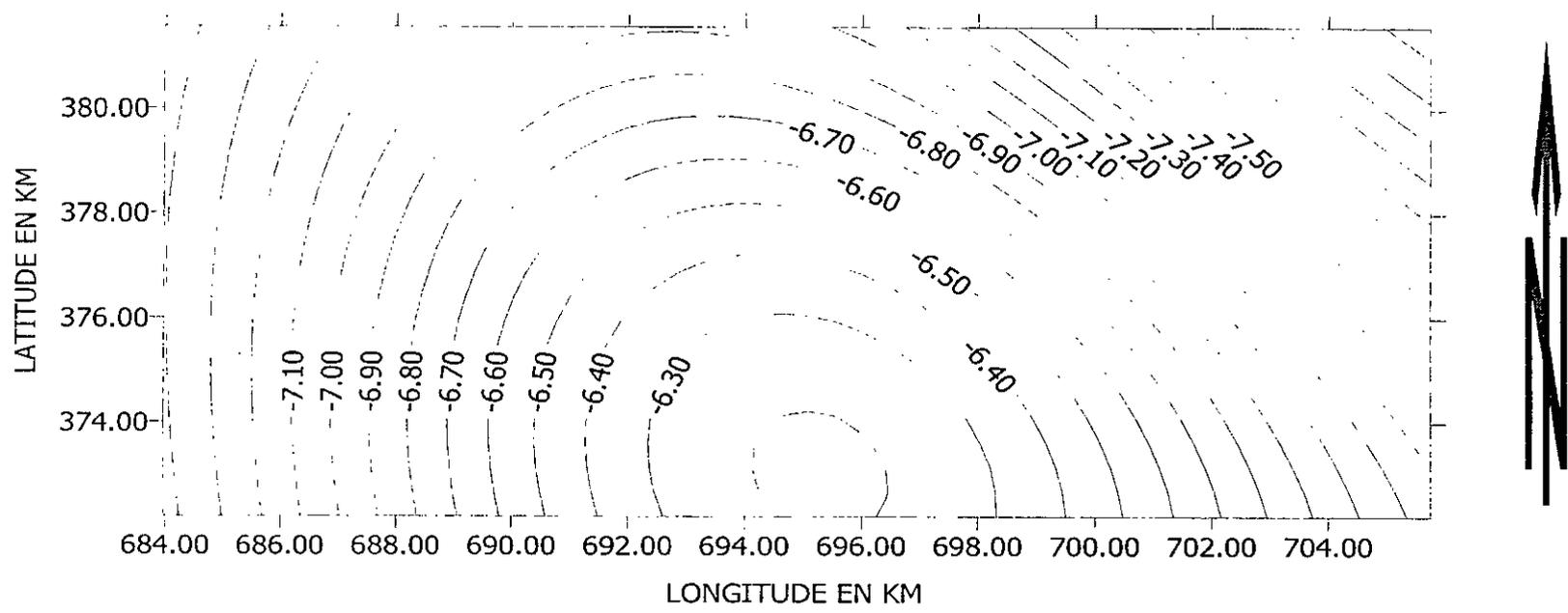


Figure VII.7 - Carte krigée du logarithme des perméabilité (Ln K) des alluvions de la Basse Vallée de la Soummam

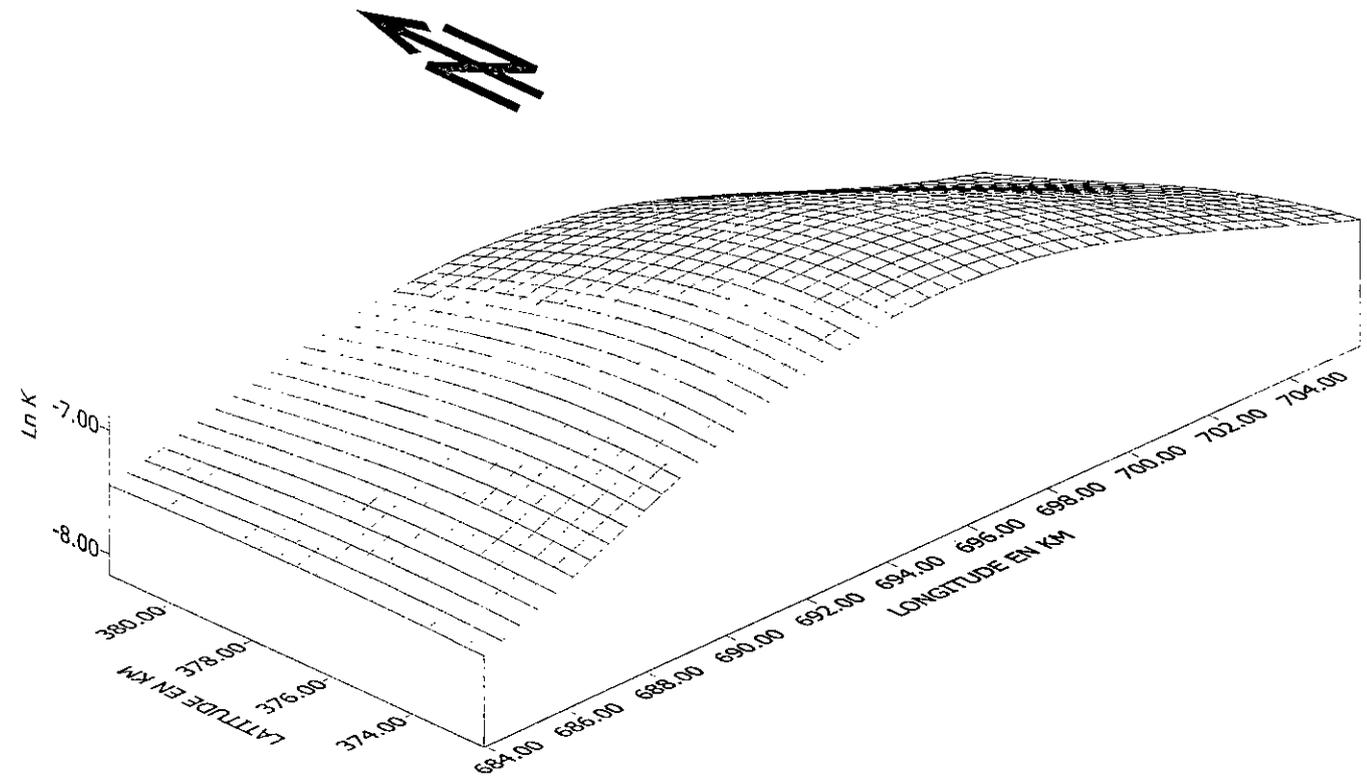


Figure VII.8 - Bloc diagramme des perméabilités (en logarithme) krigées
des alluvions de la Basse Vallée de la Soummam (Vue du Sud Ouest)

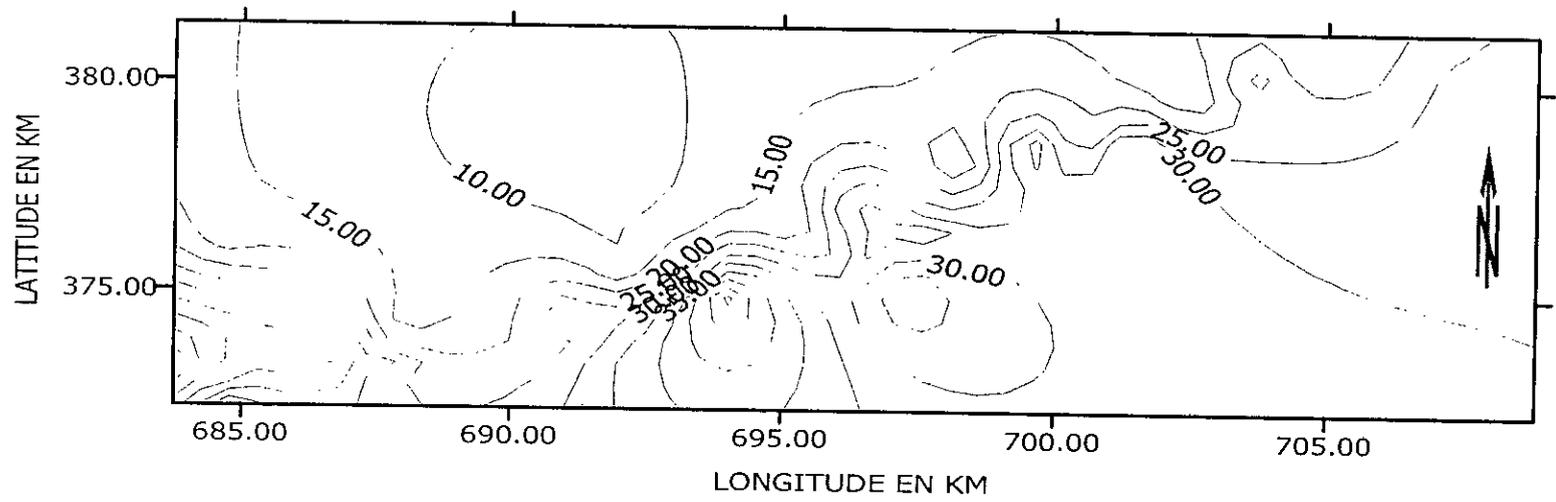


Figure VII.9 CARTE KRIGEE DES EPAISSEURS DES ALLUVIONS DANS LA BASSE VALLEE DE LA SOUMMAM

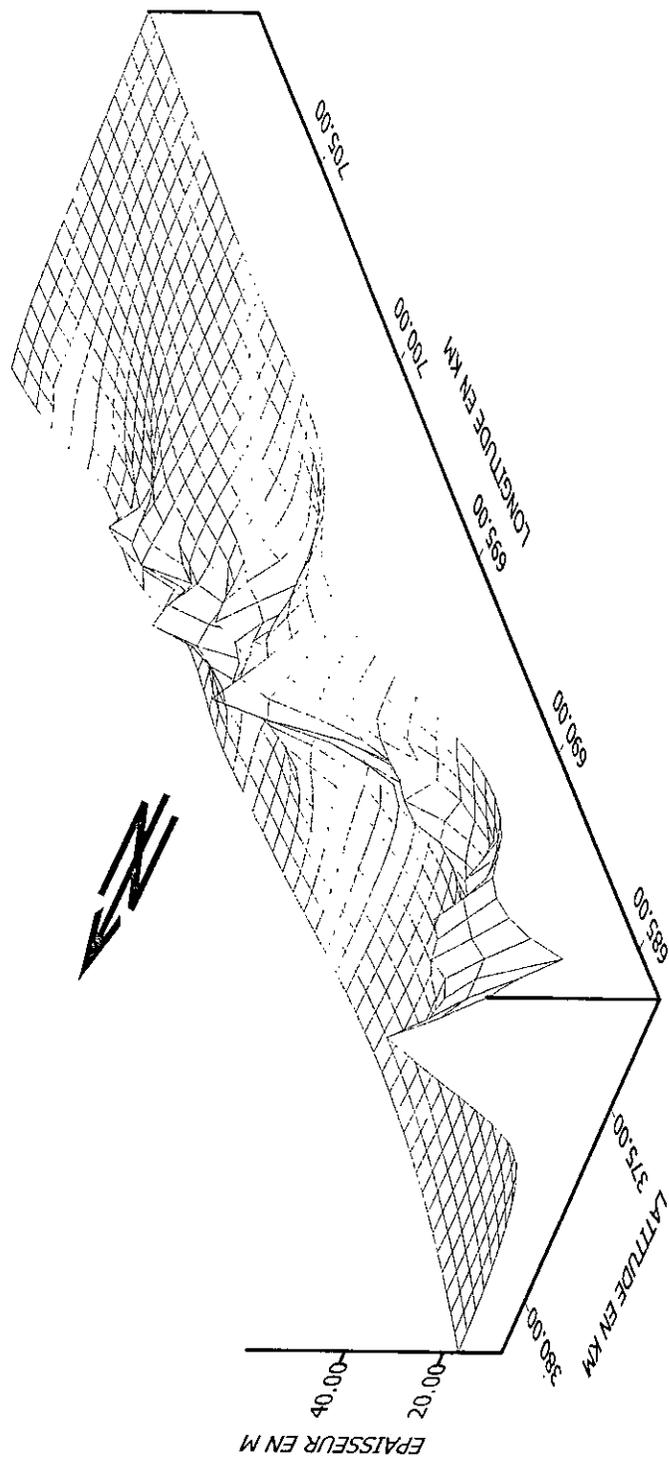


Figure VII.10 BLOC DIAGRAMME DES EPAISSEURS KRIGÉES AU NIVEAU DE LA BASSE VALLEE DE LA SOUMMAM (Vue du Sud Ouest)

IV. Conclusion

D'après cette étude géostatistique, nous pouvons conclure que:

- Les résultats obtenus par l'XVALID sont très proches des sont très proches, par le Krigeage où la moyenne tend vers 0 et la variance vers 1.
- Selon les cartes d'erreurs, les écarts sont importants à des points de mesure située en amont et la zone centrale, à Sidi Aich et el Kseur, ce qui peut être expliquée par le manque d'échantillonnage.
- Les cartes réalisées par le logiciel WINSURF, montre une variabilité des profondeurs et des perméabilités.
- La carte des perméabilités montre une anisotropie, et cela due à l'existence d'un sens Nord Est dominant.

Conclusion générale

Conclusion générale :

Au cours de cette étude, nous avons essayé d'étudier la variabilité spatiale de la perméabilité (k) et l'épaisseur (e) du réservoir alluvionnaire de la basse vallée de la Soummam.

Pour cela on a procédé à une analyse statistique détaillée avec la mise en application des méthodes géostatistiques.

Cette analyse nous a permis de conclure que :

- L'analyse statistique des données a montré une distribution dissymétrique pour les perméabilités, ce qui nous a incité à utiliser les valeurs logarithmiques dans la géostatistique.

Pour les épaisseurs l'analyse a mis en évidence la normalité de la distribution.

- L'examen des tests statistiques montre une distribution irrégulière et une hétérogénéité spatiale qui est due aux caractéristiques de l'écoulement en relation avec la nature du terrain.

- Le variogramme montre que le comportement n'est purement aléatoire, mais il obéit à une certaine lois structurales caractérisant leur variabilité spatiale.

La variographie de ces deux paramètres montre une anisotropie, expliquée par l'existence d'un sens privilégié.

- Les cartes obtenues par le logiciel WINSURF ont permis de tracer la variabilité spatiale de ces paramètres.

Ces cartes ont montré les zones perméables et moins perméables, ainsi que les dimensions des réservoirs d'eau souterraines ce qui nous permettre d'estimer le potentiel d'eaux réservées sous la plaine.

Bibliographie

1. **ABDOU.A, HAMDI.M.** 1998: Etude de la variabilité spatiale des paramètres hydrochimiques des eaux souterraines de la plaine de Beni Slimane.
Thèse d'ing. ENP.
2. **AMGHAR.M.** 1993 : Synthèse hydrogéologique de la plaine de la basse Soummam.
Thèse d'ing, USTHB.
3. **AMIRI.B, IDER.K.** 1998 : Etude de la variabilité spatiale de la charge hydraulique de l'aquifère superficiel de la basse Soummam.
Thèse d'ing. ENP.
4. **AZOUZI.B.** 1993 : Contribution à la cartographie automatique des grandeurs hydrogéologiques (application à la Mitidja).
Thèse de magister. INA.
5. **BELAID.N.** 1997 : Approche des paramètres hydroclimatologiques (application au bassin versant de la Soummam).
Thèse d'ing, USTHB.
6. **BOUDEDJA.H.** 1993 : Analyse des données pluviométriques du bassin versant de la Soummam.
Thèse d'ing, USTHB.
7. **BOUDEFUA.B.** 1991 : Approche par le calcul automatique des paramètres morphométriques.
Thèse d'ing, ed, USTHB.
8. **CASTANY.G.** 1982 : Principe et la méthode de l'hydrogéologie.
Ed, Dunob, Paris.
9. **CLINKS.C.** 1973 : Etude hydrogéologique de la vallée de l'oued-Sahel, Soummam.
Rapport de l'ANRH, Alger.

10. **DAHMANIA.1998**: Variabilité spatiale des caractéristiques hydrodynamiques.
Thèse d'ing, INA.
11. **GIRAULT. M .1967** : Elément de méthodologie statistique.
Ed, Dunob de Paris.
12. **KANTE. A. 1997.** : Application de la méthode géostatistique à l'estimation des réserves géologiques.
13. **MATHERON.1962** : Traité de la géostatistique appliquée.
Ed, Masson, paris.
14. **MEHDI. A.1993** : Essai d'approche de la modélisation mathématique de la nappe alluviale de la basse Soummam.
15. **ZAINI.1995** : Contribution de l'étude géostatistique du gisement aquifère.
Thèse d'ing, ed, ENP.
16. **ZERROUROU. M. 1990**: Contribution de l'étude hydrogéologique de la basse Soummam.
Thèse d'ing, ed, USTHB.

ANNEXE

Variabilité spatiale de l'épaisseur

3

Long Km

Lat Km

e m

| | | |
|---------|---------|------|
| 683.970 | 372.200 | 40.3 |
| 683.750 | 373.250 | 60.0 |
| 684.325 | 373.025 | 45.0 |
| 684.700 | 372.250 | 23.5 |
| 684.700 | 372.700 | 41.0 |
| 684.900 | 372.650 | 35.4 |
| 685.500 | 372.600 | 35.0 |
| 685.900 | 373.300 | 44.5 |
| 686.250 | 373.150 | 39.7 |
| 686.430 | 373.340 | 41.1 |
| 686.680 | 373.130 | 37.2 |
| 686.400 | 373.800 | 40.0 |
| 687.044 | 373.150 | 43.3 |
| 687.510 | 373.060 | 22.5 |
| 687.910 | 373.210 | 32.3 |
| 688.325 | 373.050 | 22.6 |
| 688.100 | 373.500 | 25.0 |
| 688.325 | 373.300 | 26.0 |
| 688.000 | 373.950 | 11.3 |
| 688.250 | 373.950 | 14.0 |
| 690.600 | 374.000 | 21.0 |
| 691.000 | 374.500 | 32.0 |
| 691.400 | 373.700 | 25.2 |
| 691.600 | 373.500 | 32.6 |
| 692.200 | 375.100 | 18.6 |
| 692.070 | 375.530 | 10.0 |
| 693.100 | 374.400 | 41.2 |
| 693.780 | 374.530 | 53.0 |
| 693.460 | 375.390 | 26.5 |
| 693.000 | 376.300 | 16.0 |
| 693.810 | 375.060 | 59.0 |
| 693.250 | 376.400 | 13.0 |
| 693.650 | 376.100 | 24.3 |
| 684.500 | 376.000 | 18.1 |
| 695.650 | 375.950 | 24.0 |
| 695.250 | 376.700 | 14.0 |
| 696.000 | 375.950 | 24.0 |
| 696.600 | 375.600 | 33.3 |
| 697.200 | 374.800 | 21.0 |
| 696.500 | 375.875 | 36.7 |
| 697.300 | 375.550 | 23.0 |
| 696.290 | 377.110 | 37.4 |
| 697.300 | 376.250 | 34.5 |
| 697.500 | 376.500 | 39.1 |
| 697.800 | 377.000 | 23.5 |
| 696.950 | 377.600 | 30.4 |
| 697.900 | 376.600 | 38.0 |
| 698.350 | 378.200 | 8.0 |
| 699.575 | 378.475 | 42.8 |
| 701.375 | 378.700 | 39.6 |
| 700.230 | 378.450 | 23.0 |
| 700.870 | 378.950 | 21.0 |
| 701.250 | 379.700 | 19.0 |
| 699.575 | 378.475 | 42.8 |
| 701.375 | 378.700 | 39.6 |

| | | |
|---------|---------|------|
| 700.230 | 378.450 | 23.0 |
| 700.870 | 378.950 | 21.0 |
| 699.575 | 378.475 | 42.8 |
| 701.375 | 378.700 | 39.6 |
| 700.230 | 378.450 | 23.0 |
| 700.870 | 378.950 | 21.0 |
| 701.500 | 380.000 | 14.0 |
| 702.350 | 379.400 | 14.0 |
| 702.650 | 379.630 | 12.0 |
| 703.000 | 380.400 | 16.0 |
| 703.500 | 380.000 | 23.0 |
| 703.550 | 380.300 | 30.0 |
| 704.300 | 380.550 | 19.0 |
| 704.550 | 380.500 | 16.0 |
| 705.000 | 380.500 | 19.0 |
| 705.200 | 380.500 | 18.0 |
| 705.500 | 380.500 | 17.0 |
| 705.500 | 380.750 | 18.0 |
| 705.750 | 381.350 | 17.0 |
| 707.325 | 380.150 | 27.0 |
| 708.875 | 381.250 | 26.4 |

variabilité spatiale de la perméabilité de la basse vallée de la Soummam

3

Long Km
 Lat Km
 K m/s

| | | |
|---------|---------|------------|
| 683.970 | 372.200 | 4.900E-004 |
| 685.900 | 373.300 | 8.600E-004 |
| 686.250 | 373.150 | 2.650E-005 |
| 686.680 | 373.130 | 2.540E-003 |
| 687.044 | 373.150 | 1.730E-003 |
| 687.510 | 373.060 | 2.130E-003 |
| 687.910 | 373.210 | 3.100E-003 |
| 690.600 | 374.000 | 5.700E-003 |
| 691.000 | 374.500 | 4.400E-003 |
| 691.600 | 373.500 | 8.200E-004 |
| 692.070 | 375.530 | 2.250E-003 |
| 693.100 | 374.400 | 5.080E-003 |
| 693.780 | 374.530 | 0.940E-003 |
| 693.000 | 376.300 | 3.790E-004 |
| 693.250 | 376.400 | 3.690E-003 |
| 693.650 | 376.100 | 2.270E-003 |
| 694.000 | 376.000 | 3.050E-003 |
| 694.500 | 376.000 | 1.350E-002 |
| 694.750 | 376.200 | 5.900E-003 |
| 695.650 | 375.950 | 7.500E-004 |
| 695.250 | 376.700 | 3.790E-004 |
| 696.000 | 375.950 | 1.400E-003 |
| 696.600 | 375.600 | 2.110E-004 |
| 696.500 | 375.875 | 2.270E-003 |
| 697.300 | 375.550 | 1.400E-003 |
| 696.290 | 377.110 | 1.630E-003 |
| 697.900 | 376.600 | 1.720E-003 |
| 697.500 | 376.500 | 3.700E-003 |
| 697.200 | 377.750 | 1.230E-003 |
| 698.350 | 378.200 | 1.630E-003 |
| 701.375 | 378.700 | 1.780E-003 |
| 700.230 | 378.450 | 1.780E-003 |
| 701.250 | 379.700 | 1.000E-003 |
| 701.300 | 379.800 | 1.100E-003 |
| 701.500 | 380.000 | 1.280E-004 |
| 702.350 | 379.400 | 2.060E-003 |
| 702.650 | 379.630 | 7.200E-004 |
| 703.000 | 380.400 | 7.660E-004 |
| 703.500 | 380.000 | 6.500E-004 |
| 703.550 | 380.300 | 0.760E-004 |
| 704.150 | 380.100 | 3.640E-004 |
| 704.300 | 380.550 | 0.910E-004 |
| 704.550 | 380.500 | 1.350E-004 |
| 705.000 | 380.500 | 2.860E-004 |
| 705.200 | 380.500 | 5.120E-004 |
| 705.500 | 380.750 | 5.900E-004 |
| 705.750 | 380.350 | 3.900E-004 |
| 703.000 | 381.550 | 0.740E-004 |