

## Évaluation géostatistique de tassement des différents sols du Nord-Est algérien

Souheila KHALFAOUI \*

*Laboratoire de géotechnique, Université Cheikh Larbi Tebessi-Tebessa, Faculté des Sciences et Technologie,  
Département de génie minier, Route Constantine, 12000, Algérie*

\* Correspondance, courriel : [khalfaouisouheila@yahoo.fr](mailto:khalfaouisouheila@yahoo.fr)

### Résumé

Le Nord-Est algérien est constitué de cinq principales formations géologiques de compositions pétro-minéralogiques différentes : il s'agit des formations cristallines du socle et d'un certain nombre de massifs magmatiques; des formations évaporitiques du Trias, des formations carbonatées d'âge Jurassique-Eocène, des formations argilo-gréseuses de l'oligocène (série numidienne) et enfin des formations conglomératiques, sables et argiles du Mio-Pliocène. Chacune de ces formations, en s'altérant donne un type de sol avec des propriétés chimiques, et physico-mécaniques bien spécifiques. Sur ces différents sols, sont construits des ouvrages de génie civil de petites ou grandes surfaces tels que les aérodromes, les zones d'habitation et les tracés des routes dont le dimensionnement en dépend. Il est donc nécessaire de connaître et prévoir le comportement de chacun d'eux.

La variable choisie pour l'étude géostatistique est le tassement  $S$  car ce dernier permet de ramener le problème à deux dimensions (2D); en calculant les valeurs moyennes dans les sondages et d'en étudier la variabilité latérale. Les variogrammes expérimentaux de surfaces et directionnels ont été calculés et ajustés. Ces derniers ont été utilisés pour le krigeage ordinaire de  $S$ . L'erreur relative a été calculée pour chaque krigeage et pour un niveau de confiance de 95 %. Un tableau de synthèse de l'ensemble des résultats obtenus sur chacun des sols de ces formations a été établi. Ces tableaux peuvent être utilisés comme référence pour les investigations futures.

**Mots-clés :** *tassement, géostatistique, krigeage, variogrammes expérimentaux, erreur relative.*

### Abstract

#### **Geostatistical evaluation of settlement of different soils in the North-East of Algeria**

North-east Algerian consists of five principal geological formations of different petro-mineralogical compositions : they are the crystalline formations of the base and a certain number of magmatic solid masses; evaporitic formations of Sorted, the carbonated formations of Jurassic-Eocene age, the argilo-sandy formations of Oligocene (series numidienne) and finally of the conglomeratic formations, sands and clays of Mio-Pliocène. Each one of these formations, while deteriorating gives a type of ground with chemical, and physicommechanical properties good specific. On these various grounds, are built works of civil engineering the small ones or great surfaces such as the aerodromes, the centres of population and the road alignments on which dimensioning depends on it. It is thus necessary to know and envisage the behaviour of each one of them.

The variable chosen for the geostatistic study is settlement (S) because this last makes it possible to bring back the problem to two dimensions (2d) by calculating the average values in the surveys. The experimental of surfaces and directional variogrammes were calculated and adjusted. The latter were used for the ordinary krigage of (S). Tables of synthesis of the whole of the results obtained on each ground of these formations were drawn up. These tables can be used as reference for the future investigations.

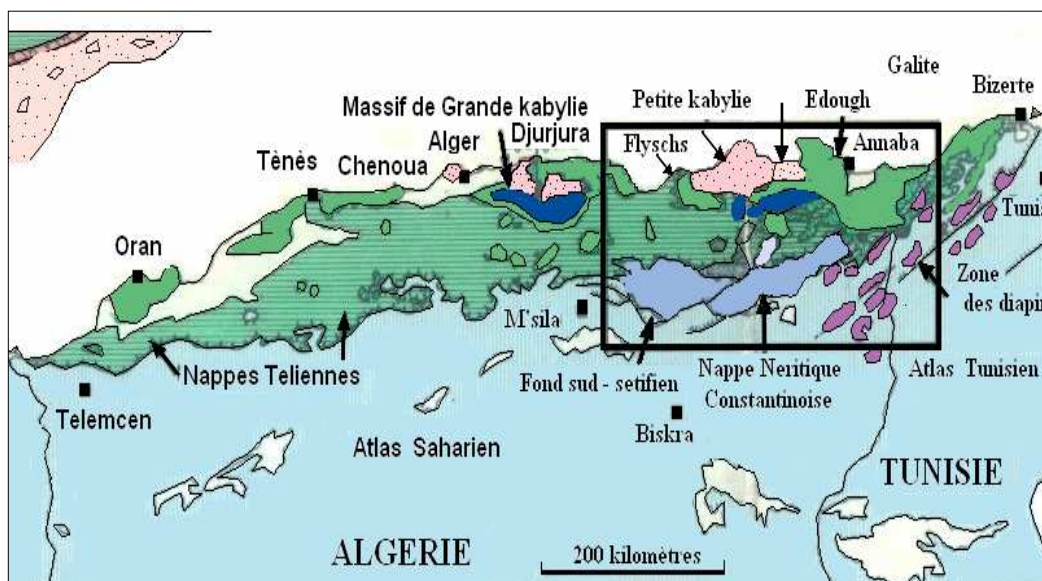
**Keywords :** *settlement, gestatistic, Kriging, experimental variogrammes, relative error.*

## 1. Introduction

Le Nord-Est algérien est constitué de plusieurs formations géologiques affleurantes et dont l'altération donnerait des types de sols différents. Les principales formations géologiques affleurantes sont, des plus anciennes au plus récentes :

- Schistes et Gneiss du Socle kabyle qui sont d'âge paléozoïque-protérozoïque ;
- Les roches argilo gypseuse du Trias [1] ;
- Les roches carbonatées (calcaires et marne) du Jurassique – Eocène [2] ;
- Les grés de l'oligocène formant la nappe Numidienne [3] ;
- Les grés et conglomérats du Moi-Pliocène [4].

Les sites d'études sont situés au Nord-Est algérien (*Figure 1*). Sur ces différents sols sont construits des ouvrages de génie civil de petites ou grandes surfaces tels que les aérodromes, les zones d'habitation et les tracés de route (Auto route Est Ouest) dont le dimensionnement et la stabilité en dépendent. Afin de rendre ces ouvrages les plus sûrs possibles. Cette étude comporte une étude géostatistique de tassement, afin de donner un modèle de déformation des différents sols de Nord-Est algérien. A l'issue de ces travaux, un tableau synthétique de l'ensemble des résultats est établi.



**Figure 1 :** *Situation géographique de la zone d'étude dans le cadre maghrébin*

## **2. Principales formations géologiques du Nord-Est algérien**

Les principales formations géologiques du Nord Est algérien sont de cinq types d'âges différents: formations cristallines, formations carbonatées, formations gypsifères évaporitiques, formations gréseuses et enfin les formations gréseuses et conglomératiques (*Figure 2*).

### **2-1. Les formations cristallines du socle**

Ces formations sont représentées essentiellement par le socle kabyle [5]. Le socle est constitué de trois ensembles superposés :

- Un ensemble supérieur : formé de schistes, ou des phyllades, des grès et des Prophyroïde ocellés ;
- Un ensemble inférieur gneissique à intercalation parfois épaisse des marbres et d'amphibolites. A la base un ensemble crustal profond est signalé. Il se compose de leptynite à grenat et à disthène, pyroxénite à grenat, marbre à périclase ;
- Le socle de Cap Bougaroun : composé de gneiss et de lherzolites serpentinisées, également des roches calciques à grenats.

Ces formations ont une superficie de 2690 Km<sup>2</sup> et leur altération donne essentiellement des argiles, kaolinites, montmorillonites.

### **2-2. Les formations évaporitiques-Trias**

Elles sont représentées par les dépôts évaporitiques. Ces formations ont généralement une extension remarquable orientée NE-SW, et s'étale sur une superficie de 14240 km<sup>2</sup>. Elles affleurent à la faveur d'extrusion, soit sous forme de masses chaotiques où dominant le gypse, les argiles et les dolomies, soit organisées en unités stratifiées localisées sur les flancs des structures [6]. Les roches du Trias sont le plus souvent entremêlées. Par contre la composition lithologique des différents ensembles rocheux est assez constante. Le Trias est généralement représenté par des marnes bariolées argileuses à gypse renfermant d'innombrables petits blocs de roches disséminés dans la masse argilo-gypseuse. Ces blocs sont le plus souvent des dolomies grises ou gris noir. Des roches diverses, calcaire, cargneules, grès et ophites peuvent également être emballées dans les marnes gypsifères. Le Trias a fait l'objet de nombreuses études pétrographiques, notamment en Tunisie mais aussi en Algérie. Les roches de terrains étudiés présentent une composition minéralogique différente d'une roche à l'autre, les plus dominants sont : Les minéraux argileux, les minéraux carbonatés, les sulfates, les chlorures, minéraux ferrifères et quartz.

### **2-3. Les formations carbonatées-dépôts Jurassique-Eocène**

Ces formations correspondent au domaine externe qui est formé par un empilement complexe de nappes surmontant au Sud l'autochtone présaharien des hautes plaines. En Algérie orientale, on distingue du Nord vers le Sud les unités suivantes :

*L'unité ultratellienne* : ont été définies à Djebel Sba au Nord de Guelma et au Nord de Kef Sidi Driss par [7]. La dénomination ultratellienne comporte un Crétacé inférieur constitué de marne, marno-calcaire, et un Crétacé supérieur présente un Turonien à Phtanite et Sénonien marneux épais très claire avec quelques bancs calcaires riches on Globotruncana. A cette série associe un paléogène marneux de couleur noire et un éocène calcaire à Globigérine, avec des niveaux à silex à la base.

*L'unité tellienne sensu stricto (S.S)*: il s'agit d'un empilement de nappes complexes. Ces unités telliennes reposent au Sud sur le pays parautochtone. Au Nord sont chevauchées par les nappes ultratelliennes. Ces unités comportent des formations marno-calcaires à ammonite d'âge Varien à Aptien passant à des pélites sombres à lits gréseux d'âge Albien du Crétacé supérieur, est micro conglomératique. Le paléogène est très puissant avec des calcaires à Globigérine d'âge Yprésien et une série marneuse à lumachelle et huître d'âge Lutétien.

*Les unités méridionales à Nummulites*: le Crétacé n'est pas connu par tous dans ces unités par contre l'Eocène calcaire riche en Nummulite d'âge Yprésien et l'Eocène marneux à Huîtres d'âge Lutétien sont présents. La puissance de ce dernier dépasse les 2000 m. Ces séries sont surmontées par les nappes telliennes.

*Domaine néritique constantinois*: il constitue les massifs de Debagh, Rochet de Constantine et Ain.Mlila et la série de Djebel Djehfa. Généralement à la base un Trias comportant un calcaire et un ensemble gréseux pélitique, puis un Jurassique calcarodolomitique et un Crétacé calcaire devenant marneux au sommet.

*Domaine des Sellaoua*: Ces formations affleurent dans la région de Chebket Sellaoua, Ain Fakroune, Ain Berbech. Ces formations se sont déposées dans un large sillon de direction Nord Est- Sud Ouest. L'Eocène est connu sauf dans la région de Ain Fakroune et de Taoura, par contre le Jurassique est connu sous forme de dolomie et d'éléments de conglomérats (Hamam Nbaïl's).

Pour la lithologie des formations d'âge Jurassique, elle est représentée par des marnes vertes jaunâtres et des grès quartzeux. L'épaisseur des grès est de 150 à 200 m. Un large développement des calcaires et des marnes dolomitiques est à signaler au niveau de ces formations. Par endroits, les grès quartzeux s'intercalent dans les argilites et les marnes. Les argilites sont de couleur grise verdâtres, feuilletées à stratification fine et horizontale. L'épaisseur de Valanginien-Hauterivein varie de 400 à 750 m. L'altération des roches carbonatées donne des sols riches en calcite, carbonate ( $\text{CaCO}_3$ ) et sulfate.

#### **2-4. Formations argilo-gréseuses de la série numidienne – (Oligocène)**

Le Numidien désigne «un immense radeau qui s'étend de la région de Guelma jusqu'à Bizerte (Tunisie) Sur près de 200km de long et sur une largeur moyenne de 30 à 40km ». Les dépôts qui constituent le numidien sont d'âge oligocène. Les formations du Numidien se déposent sur une superficie d'environ 14905 Km<sup>2</sup>. La série Numidienne est formée par deux assises : La partie supérieure d'âge Oligocène supérieur (GR) formée par des grès quartzeux feldspathiques, avec de faible intercalation de granulites, des conglomérats et des argiles. Les grès sont épais à cassure jaunâtre ou blanchâtre à quartz roulé très hétérogène de granulométrie variable. L'assise inférieure est formée par des argiles grises foncées, à violacées à rares bancs gréseux à Tubotamaculum, d'âge Préabonien. L'altération de ce type de roches donne des sables.

#### **2-5. Les formations Mio-Pliocène**

Les formations Mio-Pliocène s'étalent sur une surface de 12896 km<sup>2</sup>. Il s'agit d'un ensemble conglomératique à la base, de teinte rouge vif, avec alternance régulière d'argiles sableuses jaunâtres où s'intercalent encore quelques passées rouge vif, et il est formé par des argiles blues grises ou noirâtre avec quelque gypse. Il comporte aussi une intercalation de calcaire sableux ou de calcaire travertineux, de micropoudingues, et de brèches avec des lentilles de grés et de marnes. Les dépôts du Miocène sont constitués de grès quartzeux accompagnés de quelques niveaux de wackes. Il existe aussi des intercalations argileuses et marneuses. Le composant majeur des grés et des wackes est le quartz à grains généralement émoussés, luisants, indiquant un long transport dans l'eau. Il existe quelques fragments de bois silicifiés et des éléments érodés de la croûte ferrugineuse.

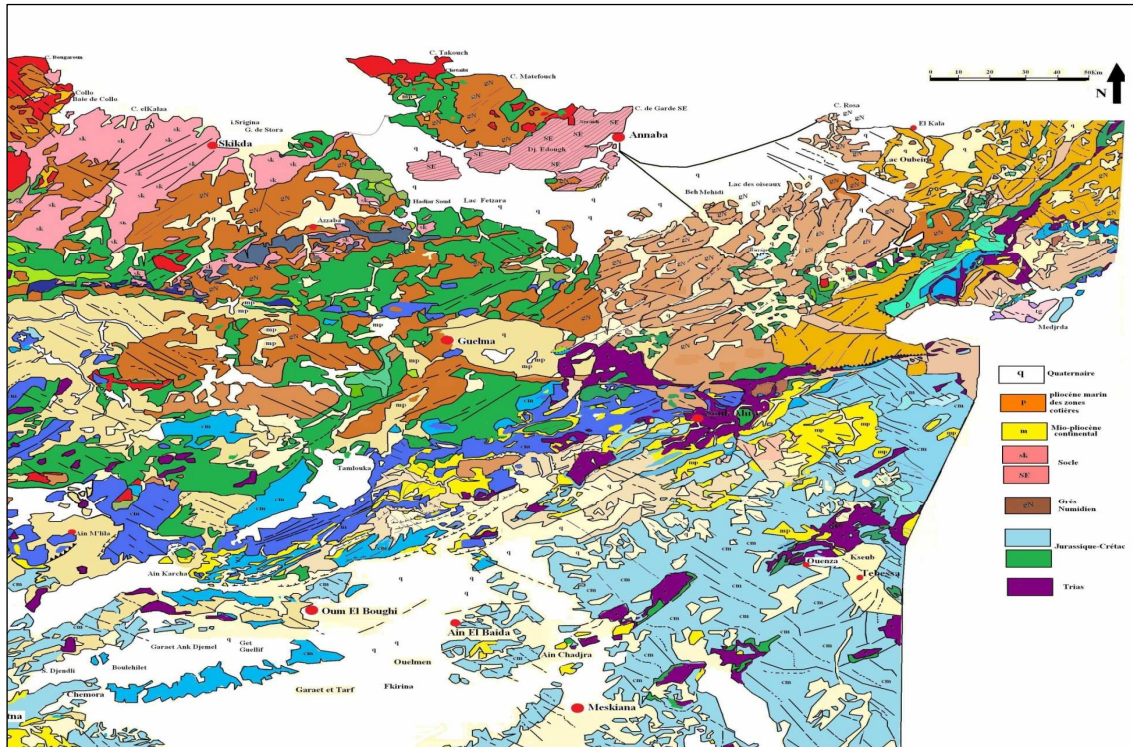


Figure 2 : Carte géologique du Nord-Est algérien [8]

### 3. Matériel et méthodes

La méthode utilisée est la procédure géostatistique de krigeage ordinaire. La géostatistique ou théorie des variables régionalisées a pour objet l'étude des fonctions aléatoires [9,10] a introduit la notion de variables régionalisées pour quantifier un phénomène à caractère aléatoire manifestant une structure de variabilité spatiale comme par exemple le tassement des sols (S). Il a donné un fondement théorique à l'analyse probabiliste des variables régionalisées. Cette théorie a déjà été utilisée dans plusieurs travaux de recherche en géotechnique. [11,12]. La prise en compte des corrélations spatiales des paramètres de reconnaissance, par l'utilisation des variogrammes, permet leur estimation dans le biais de leur valeur à n'importe quel point ou de leur valeur moyenne dans n'importe quel volume de l'espace de définition, ainsi que le calcul de la variance d'estimation peut se faire à l'aide de krigeage ordinaire qui tient compte de la structure spatiale de la variable régionalisée ainsi que de la répartition des mesures par rapport au volume ou aux points à estimer [13]. Les valeurs des variances de krigeage et leur répartition spatiale permettant donc de se prononcer sur la qualité du dispositif de reconnaissance.

#### 3-1. Variogramme

L'outil de base qui caractérise la fonction aléatoire est le variogramme. Il quantifie la régionalisation. La fonction semi-variogramme est généralement désignée par  $\gamma(h)$ . Elle est, par définition, égale à la moitié de l'espérance mathématique des écarts quadratiques des valeurs  $Z(x)$  et  $Z(x+h)$  observées aux points  $x$  et  $x+h$  :

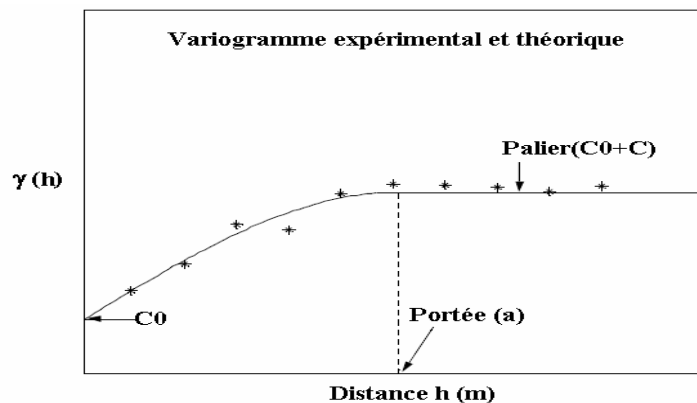
$$\gamma(h) = (1/2) E\{ [Z(x) - Z(x+h)]^2 \} \quad (1)$$

Sous l'hypothèse dite "intrinsèque" selon laquelle le semi-variogramme ne dépend que du vecteur  $h$ , ce variogramme théorique peut être estimé par un semi-variogramme  $g^*(h)$  dit expérimental qui est calculé à l'aide de la formule suivante :

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

où  $N(h)$  est le nombre de couples des mesures  $Z(x)$  et  $Z(x+h)$ ,

Ce semi-variogramme expérimental est, par la suite, ajusté à l'aide d'un des modèles théoriques qui sont bien établis. Le variogramme expérimental peut être calculé à 1, 2 ou à 3 dimensions. Les résultats de calcul d'un variogramme expérimental peuvent être représentés sous forme graphique (*Figure 3*).



**Figure 3 :** Représentation graphique d'un variogramme

### 3-2. La procédure géostatistique de krigeage ordinaire

Cette procédure consiste à trouver le meilleur estimateur linéaire possible  $Z^*(x)$  d'une variable régionalisée (VR) d'un volume  $V$  ou d'un point  $X$  de l'espace de définition en utilisant les mesures expérimentales  $Z_i$  et l'information structurale représentée par le variogramme de la régionalisation étudiée [14]. Avec :

$$Z^*(x) = \sum_{i=1}^N \lambda_i Z_i \quad (3)$$

Il s'agit donc de calculer les pondérateurs  $\lambda_i$  tel que  $Z^*(X)$  soit un estimateur sans biais et que la variance d'estimation soit minimale sous l'hypothèse de stationnarité c'est à dire quand :

$$E[Z(x)] = E[Z(x+h)] = \text{constante} = \text{moyenne} \quad (4)$$

et :

$$E[Z_v] = E[Z_i] = \text{constante} = \text{moyenne} \quad (5)$$

La condition de non biais est :

- la variance de  $Z(x)$  soit égale à la variance de  $Z(x+h)$

$$\text{Var}[Z(x)] = \text{Var}[Z(x+h)] \quad (6)$$

- la somme des pondérateurs soit égale à 1.

$$\sum_{i=1}^N \lambda_i = 1 \tag{7}$$

La minimisation de la variance d'estimation sous la condition de non biais, utilisant le formalisme de Lagrange, permet d'aboutir à un système de N+1 équations à N+1 inconnues qui sont les N pondérateurs  $\lambda_i$  et  $\mu$  le paramètre de Lagrange. Ce système est dit "système de krigeage ordinaire" :

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^N \lambda_i \cdot \gamma(x_i, x_j) + \mu = \gamma(x_j, V); & \text{avec...} i = 1..à..N...et....j = 1..à..N \\ \sum_{i=1}^N \lambda_i = 1 \end{cases} \tag{8}$$

avec :

$$\gamma(x_j, V) = \frac{1}{V} \int_V \gamma(x_j, x_k) dx_k \tag{9}$$

où N est le nombre de mesures les plus proches de V (ou de X si V est un point), g est la fonction semi-variogramme;  $x_i$  et  $x_k$  les points de mesures. A chaque valeur  $Z_k$  estimée par krigeage ordinaire, est associée sa variance de krigeage  $\sigma^2_k$  qui est égale à :

$$\sigma_K^2 = \sum_{i=1}^N \lambda_i \gamma(x_i, V) - \gamma(V, V) + \mu \tag{10}$$

et où :

$$\gamma(V, V) = \frac{1}{V^2} \iint_V \gamma(x_k - x_l) dx_k dx_l \tag{11}$$

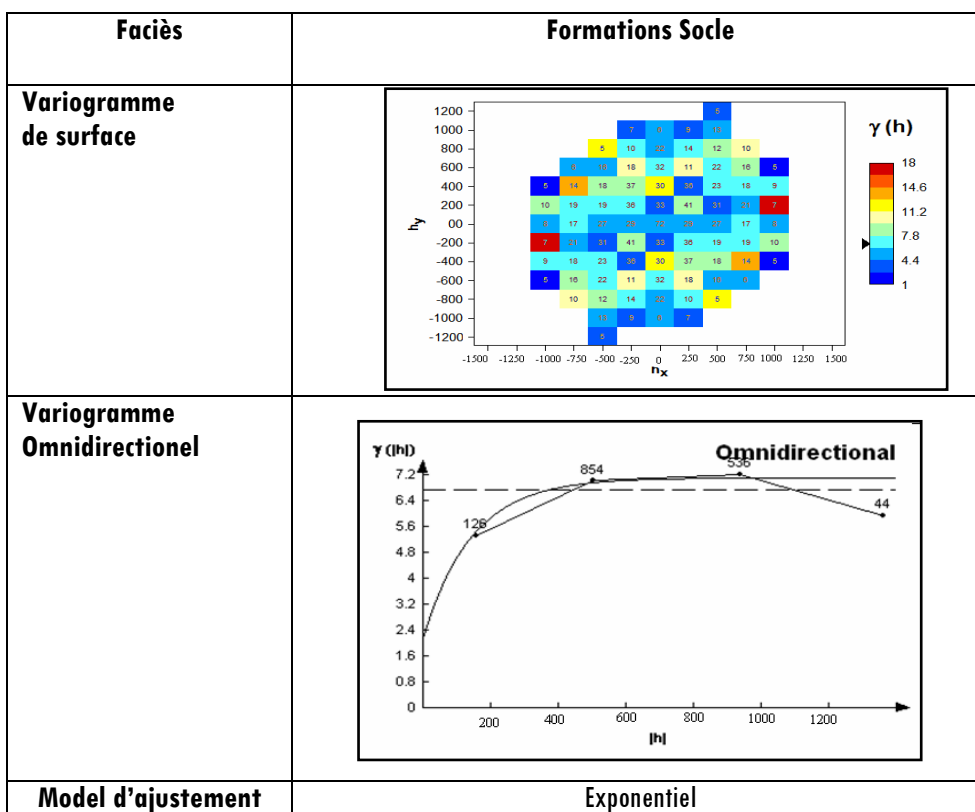
## 4. Résultats et discussion

### 4-1. Variographie de tassement

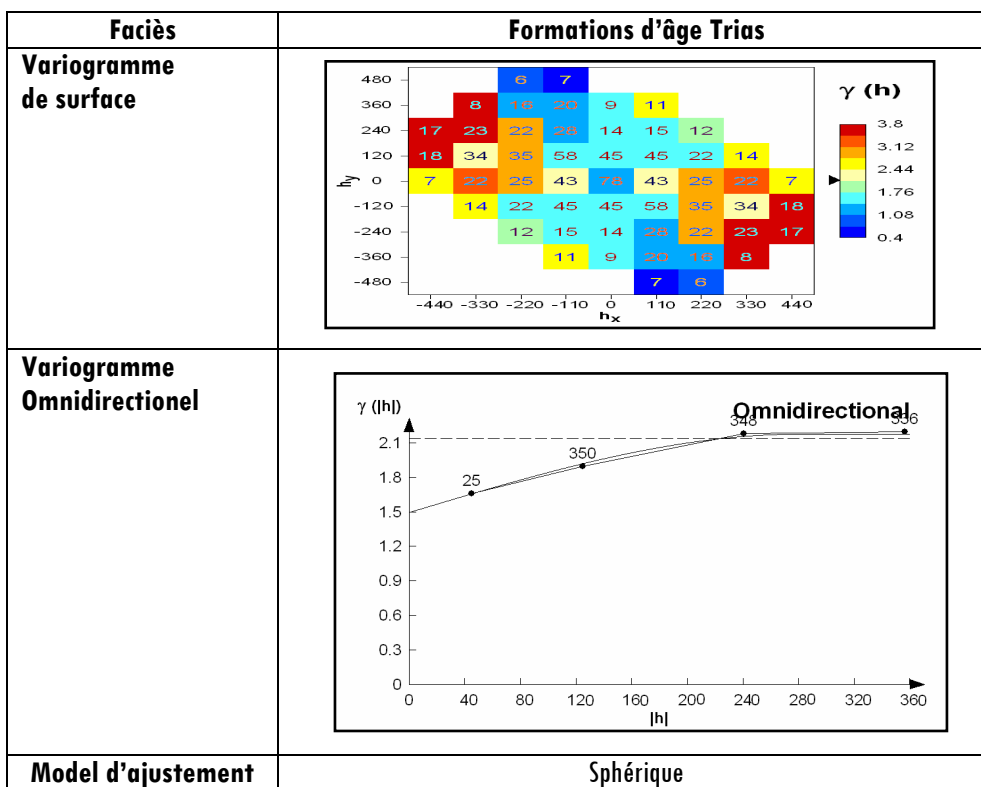
Le tassement du sol a été calculé par la méthode odométrique dans certains nombres de site représentant les cinq types du sol caractérisant le Nord-Est algérien. Cette déformation verticale du sol a été choisie comme variable régionalisée, afin de présenter la répartition spatiale des principaux paramètres géotechniques permettant le calcul du tassement. Les variogrammes de surfaces montrent une anisotropie variable [15]. Les variogrammes exprimant un omnidirectionnel ont été calculé et modélisé montrent un effet de pipite qui varie entre 0.44 et 3.25 m<sup>2</sup> pour les cinq types de sol (**Tableaux 1 à 5**).

- Formations Socle :  $\gamma(h) = 2.13 + 5. \gamma_{exp}(430m)$
- Formations d'âge Trias :  $\gamma(h) = 0.44 + 1.54. \gamma_{sph}(197m)$
- Formations d'âge Jurassique – Eocène :  $\gamma(h) = 3,25 + 24,75. \gamma_{sph}(609,0m)$
- Formations d'âge Oligocène:  $\gamma(h) = 2.04 + 12. \gamma_{sxp}(295m)$
- Formations d'âge Moi –pliocène :  $\gamma(h) = 1.46 + 3.55 \gamma_{sph}(377m)$

**Tableau 1 : Variographie du tassement des formations Socle**

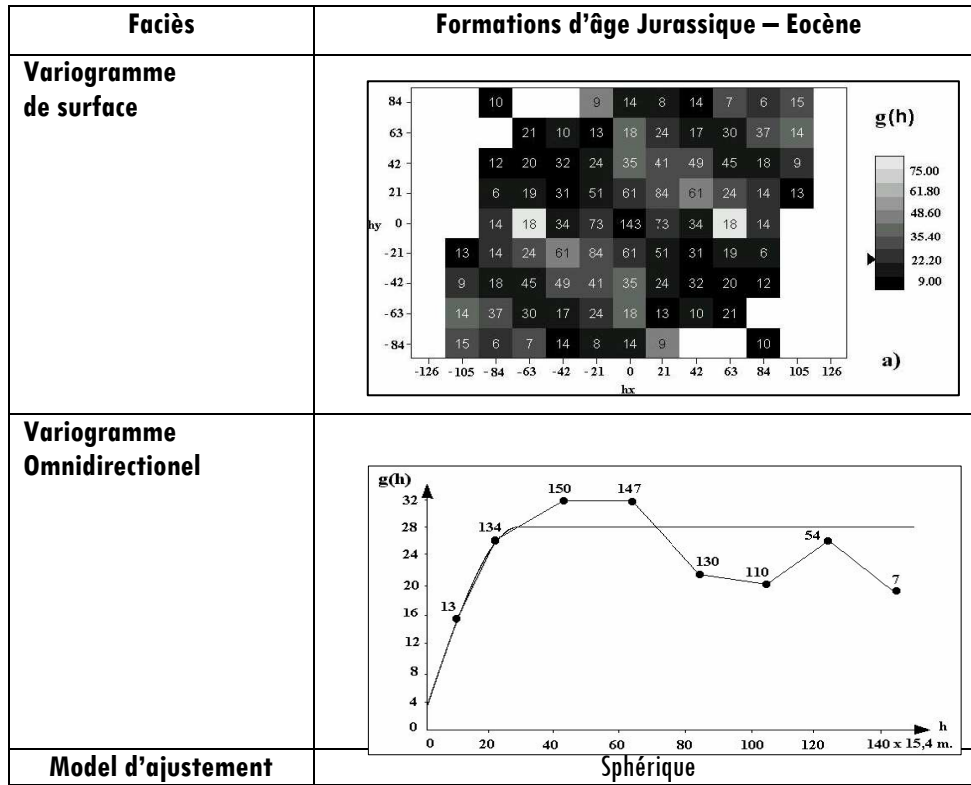


**Tableau 2 : Variographie du tassement des formations d'âge Trias**

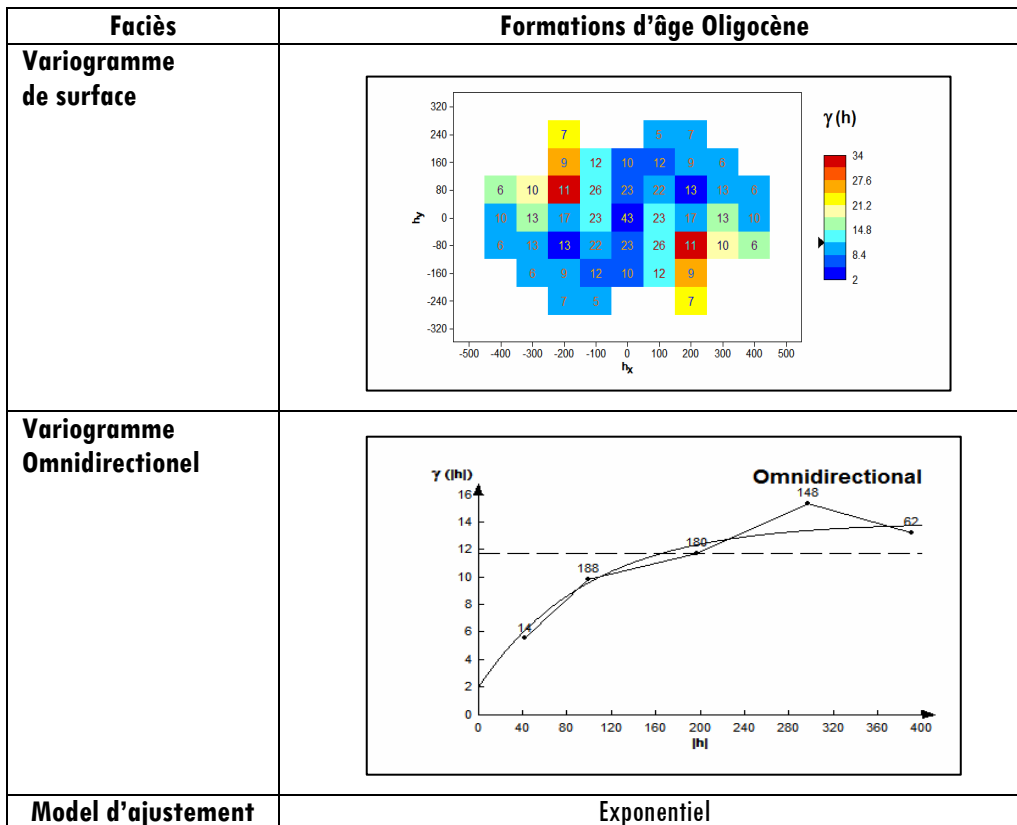


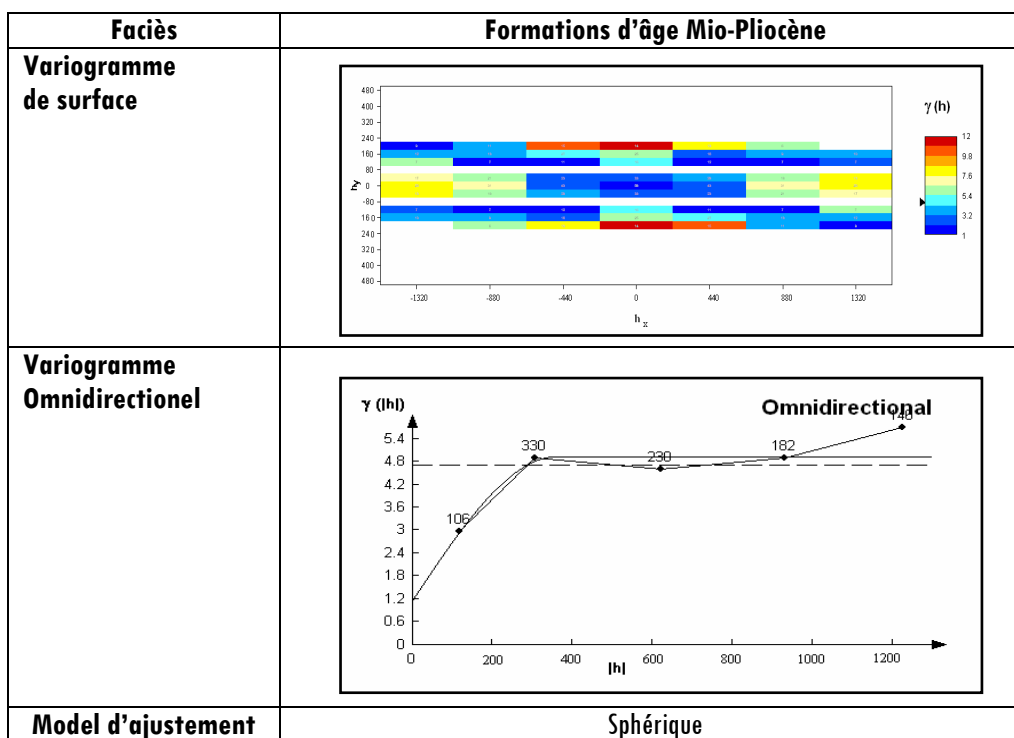


**Tableau 3 : Variographie du tassement des formations d'âge Jurassique-Eocène**



**Tableau 4 : Variographie du tassement des formations d'âge Oligocène**



**Tableau 5 : Variographie du tassement des formations d'âge Mio-Pliocène**

#### 4-2. Résultats de Krigeage ordinaire du tassement

Les résultats de la variographie du tassement de ces différents sols ont été utilisés pour le krigeage. La moyenne des valeurs krigées varie de 3,13 à 30,87 cm. Une variance de krigeage varie de 1,82 et 9,93 cm<sup>2</sup>. L'erreur relative est calculée par l'équation suivante :

$$\varepsilon = \frac{2}{Moy} \sqrt{\sigma_k^2} \cdot 100 \approx 86,20\% \quad (12)$$

avec :

$\sigma_k^2$  : Variance d'estimation krigée (cm<sup>2</sup>)

Moy : Moyenne des isovalues krigés de tassement (cm)

L'erreur minimale est signalée au niveau des sols d'âge Jurassique-Eocène (**Tableau 6**).

**Tableau 6 : Résultats de krigeage ordinaire du tassement des cinq types des sols**

Faciès	Socle	Formations d'âge Trias	Formations d'âge Jurassique- Eocène	Formations d'âge Oligocène	Formations d'âge Mio-Pliocène
$\bar{X}$	3,13	4,75	30,87	7,64	4,16
$S^2$	1,31	0,70	30,05	3,57	1,15
$\sigma_k^2$	1,82	0,41	9,93	5,03	0,68
<b>N.B</b>	210	34	455	176	25
$\varepsilon$ (%)	86,20	27,18	20	59	40

**Note :**

- $\bar{X}$  : Moyenne des isovaleurs krigés de tassement (cm)
- $S^2$  : Moyenne de variance de krigeage de tassement (cm<sup>2</sup>)
- $\sigma_k^2$  : Variance d'estimation krigée (cm<sup>2</sup>)
- N.B : Nombre de bloc krigés
- $\epsilon$  : Erreur relative (%)

**Tableau 7 :** Paramètres des variogrammes du tassement dans les cinq types des sols du Nord-Est algérien

Faciès	Direction (°)	Nugget (cm) <sup>2</sup>	Modèle	Sille (cm) <sup>2</sup>	Range (m)	Coefficient d'anisotropie	Erreur relative (%)
Socle	0±90	2.13	exponentiel	5	430	1	86
Trias	0±90	1.49	Sphérique	0.68	280.4	1	27.18
Jurassique - Éocène	0±90	3,25	Sphérique	24,75	608	1	20
Oligocène	0±90	2.04	exponentiel	12	295	1	59
Mio_Pliocène	0±90	1.46	Sphérique	3.5	377	1	40

**5. Conclusion**

Le Nord-Est algérien se compose de cinq principales formations géologiques : les formations du socle, du Trias, Jurassique-Eocène, les formations Oligocène (des séries numidiennes) et celles du Mio-pliocène. Au cours de leur histoire géologique, ces formations ont été altérées à cause des différents types de désagréments, entre autre la désagrégation mécanique et chimique. L'analyse géostatistique de tassement des cinq types des sols a permis d'obtenir les résultats suivants :

Les variogrammes expérimentaux de surface de tassement des sols ont montré des anisotropies différentes. Cependant les variogrammes expérimentaux omnidirectionnels ont été ajustés à l'aide de différents modèles (**Tableau 7**). Il en ressort que les portées varient de 300m à 608m (Crétacé). Les erreurs relatives sont parfois très fortes 86 % pour le Socle). Ce ci est dû au fait que sur ces sites les mailles étaient irrégulières. La porté du variogramme Socle est de 430 m. Une maille de 200x200 m peut donc être satisfaisantes. Certains sols de formations telles que ceux du Socle et de l'Oligocène peuvent être complétées. Ce tableau peut être utilisé comme référence pour préparer les campagnes d'investigations sur ces différents types de sols.

**Références**

- [1] - A. BOUZENOUNE, H. ROUVIER et J. THIBIÉROZ, Trias de l'Ounza, contexte diapirique, zonation minéralogique et conséquences métallogéniques. *Bull. Serv. Géol. Algérie* (1995) 63-24.
- [2] - D. BUREAU, Principaux traits de la structure des monts de Batna, Belezema. (Algerie). *Bull. Serv. Géol., France* (1970) 1-210
- [3] - A. CHOUABBI, Étude géologique de la région de Hammam N'bails (SE de Guelma ; un secteur des zones externes de la chaîne Maghribides. Thèse troisième cycle. Université Toulouse (1987) 3-123

- [4] - W. KOWALSKI, Paléogéographie du Miocène des environs d'El (Nord de Tebessa). *Bull. Serv. Géol. Algérie* (2002) 1-10
- [5] - J. M. VILA, Répartition en fenêtre de l'axe autochtone Hahouner-Debar à l'Est de Guelma aux environs de la station de Nador (feuille au 1/50 000 DE Guounod-la Mahouma NE du constantinois, Algérie). *Bull. Soc. Géol. France* (1980) 811-813
- [6] - M. DURAND DELGA, Étude géologique de l'Ouest de la chaîne numidique (Thèse, Paris), *Bull. Serv. Carte géol. Algérie, (2); Stratigr., Description régionales* (1980) 24 -143
- [7] - A. BOUZENOUNE, Minéralisation péridiapiriques de l'Aptien calcaire ; les carbonates de fer du gisement hématique de l'Ounza (Algérie Orientale, Thèse Dct. UNIV ; Paris VI (1993) 1-209.
- [8] - J. F. RAOULT, Géologie du centre de la chaîne numidique-Nord du constantinois, Algérie. Mémoire n°121 publié avec le concours du centre national de recherche scientifique (1968) 1-149
- [9] - M. DURAND DELGA, Étude géologique de l'Ouest de la chaîne numidique (Thèse, Paris) *Bull. Serv. Carte géol. Algérie, (2); Stratigr., Description régionales* (1980) 1 143.
- [10] - G. MATHÉRON, Traité de géostatistique appliquée. Mém. B.R.G.M., 14 (1962a) 1-333.
- [11] - G. MATHÉRON, Traité de géostatistique appliquée. Mém. B.R.G.M., 14 (1962b) 1-306
- [12] - P. CHIASSON, J. LAFLEUR, M. SOULIÉ et K. T. LAW, Characterizing spatial variability of a clay by geostatistics. *Revue Canadienne de Géotechnique* (1995) 1-10.
- [13] - S. KHALFAOUI, Évaluation géostatistique de la maille de reconnaissance géotechnique de l'aérodrome de Batna (N-E algérien). Article *revue géotechnique française* (2005) 67-75.
- [14] - M. MAIGAN, Note de géostatistique. Université de Lausanne. Institut de minéralogie. Séminaire de simulation et de prospection (1977) 1-81.
- [15] - A. G. JOURNEL, AND C. J. HUIJBREGTS, Mining geostatistics. *Academic Press, London* (1978) 1-600
- [16] - Y. PANNATIER, "Variowin": software of spatial data analysis in 2D University of Lausanne, Switzerland (1995) 1-72.