

Évaluation géostatistique de la maille de reconnaissance géotechnique de l'aérodrome de Batna (N-E algérien)

S. KHALFAOUI

Université Cheikh Larbi
Tébessi-Tébessa
Département des Mines
BP 154, Meskiana
Wilaya d'Oum El Bouaghi 04
Algérie
khalfaoui.souheila@
caramail.com

H. MEZGHACHE

Université Badji Mokhtar
Faculté des Sciences
de la Terre
Département de Géologie
BP 12 Annaba
23000 Algérie
mezghache2000@yahoo.fr

Résumé

Le site de l'aérodrome de Batna, en Algérie, a donné lieu à deux campagnes de reconnaissance géotechnique. La première campagne a été effectuée en 1984, par l'International Airports Authority of India (IAAI) qui a réalisé 50 sondages implantés suivant une maille de 200 x 200 m ; 170 carottes ont été prélevées. Ces dernières ont été soumises à des essais physico-mécaniques et les résultats furent expertisés, en 1990, par la Société algérienne des études techniques des infrastructures (SAETI). Cette société avait réalisé quatre autres sondages et avait recommandé de resserrer la maille. Afin de s'assurer du bien-fondé de ces recommandations, l'ensemble des résultats a été analysé à l'aide d'une méthode statistique multivariable qui est l'analyse en composantes principales (ACP) et la méthode géostatistique de krigeage ordinaire du « tassement ». L'ACP a montré que le tassement est corrélé négativement à la teneur en eau et au poids volumique humide du sol. Les cartes d'isovaleurs ont été établies. Les valeurs krigées varient fortement d'un endroit à un autre. Ces résultats faciliteront l'optimisation des traitements de sol à prévoir pour uniformiser le comportement de la piste. Les variances de krigeage varient peu : il n'y a donc pas de zones sous-reconnues. L'erreur relative sur le « tassement » a été estimée à 20 % au maximum pour un niveau de confiance de 95 %. Si cette erreur est satisfaisante, il ne serait donc pas utile de resserrer la maille.

Mots-clés : géotechnique, géostatistique, tassement, estimation, maille de reconnaissance, statistiques multivariées, krigeage ordinaire, cartographie.

Geostatistical evaluation of geotechnical reconnaissance mesh of Batna aerodrome (N-E algeria)

Abstract

The Batna airport has been subject to two geotechnical investigations. During the first survey, carried out by the International Airport Authority of India (IAAI) in 1984, fifty bore holes have been implanted according to a 200 x 200 m mesh, and the geotechnical characteristics of 170 core samples have been analysed. The appraisal of the results was carried out by the Algerian Company of Technical Studies and Infrastructures (SAETI) in 1990. This company has also realised four other boreholes and has recommended to make more boreholes, with a denser mesh. To insure the reliability of these recommendations, the results have been analysed in this paper using a multivariate statistical analysis which is Principal Component Analysis (PCA) and the geostatistical method of the ordinary kriging applied to the settlement. The PCA has shown that the settlement is negatively correlated to the water content and to the wet volumetric weight of soil. Maps of isovalues of these parameters have been established. The results show that kriged values vary strongly from one place to another.

Introduction

La nécessité de développer le transport dans la région des Aurès, d'une part, et les excellentes conditions de visibilité, climatiques et géomorphologiques, d'autre part, ont permis aux pouvoirs publics de projeter et de réaliser un aéroport à 22 km de la ville de Batna (Fig. 1). Cet aéroport disposera de deux pistes principales (Fig. 3). La première piste a une longueur de 3000 m et une direction de 55° 9' N, tandis que la seconde piste est longue de 3200 m et sa direction est de 321°44' N. En général, le sol est constitué par les argiles jaunâtres et les dépôts sablo-gypseux du Quaternaire. Cependant, il était nécessaire de procéder à la reconnaissance géotechnique du sol par sondages mécaniques afin de construire un ouvrage stable et répondant aux normes et exigences du génie civil. Cette tâche a été confiée, en 1984, à l'International Airports Authority of India (IAAI) qui a effectué 50 sondages mécaniques implantés selon une maille de 200 x 200 m; 170 carottes ont été prélevées. Ces dernières ont été soumises à des essais physico-mécaniques. Les résultats de cette campagne furent expertisés, en 1990, par la Société algérienne des études techniques des infrastructures (SAETI) qui a réalisé quatre autres sondages et a recommandé de resserrer la maille en réalisant une dizaine d'autres. Afin de

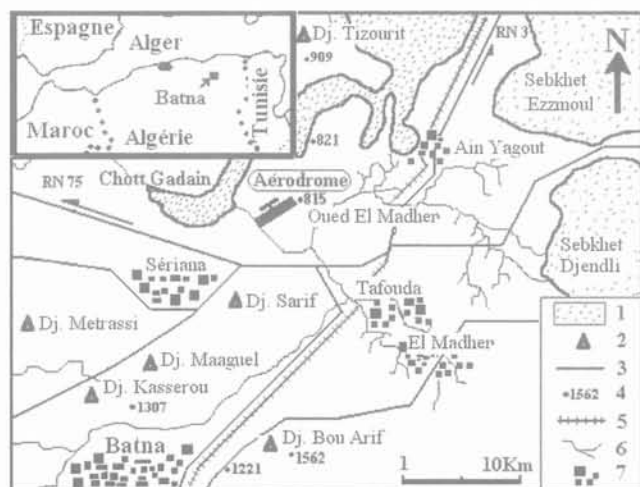


FIG. 1

Situation géographique de l'aéroport de Batna.

1 - Chott ; 2 - Sommet du Djebel ; 3 - Route nationale ; 4 - Altitude ; 5 - Chemin de fer ; 6 - Cours d'eau ; 7 - Localité.

Location of the Batna airport.
1 - Salt lake basin ; 2 - Summit of the Djebel ; 3 - National road ; 4 - Altitude ; 5 - Railway ; 6 - Stream ; 7 - Locality.

These results will enable the optimization of soil processings to standardize the track behavior. The kriging variances show little variation, showing that all zones are well known. The relative error of « the settlement » analysis has been estimated at 20 % for a threshold of 95 %. If this error is satisfactory, than the use of a tighter mesh is not necessary.

Key words : soil engineering, geostatistic, settlement, estimation, mesh of reconnaissance, multivariate statistics, ordinary kriging, Mapping.

Cadre géologique et hydrogéologique du site

La géologie et l'hydrogéologie de la région et du site ont été étudiées par plusieurs spécialistes parmi lesquels Bureau (1970, 1971, 1973 et 1974), Vila (1980), IAAI (1984), SAETI (1990) et Bourkouche (1997). La région appartient au domaine autochtone ou para-autochtone aurésien.

La série stratigraphique s'étend du Trias au Quaternaire (Fig. 2). Elle se présente comme suit :



FIG. 2

Schéma géologique et structural de la région du site (Bureau, 1974).

1 - Axe anticlinal ; 2 - Axe synclinal ; 3 - Contact anormal et faille inverse ; 4 - Faille ; 5 - Crétacé inférieur : marnes dolomitiques et alternances de grès et de marnes ; 6 - Marnes, grès et calcaires de l'Albo-aptien ; 7 - Crétacé supérieur : calcaires et calcaire marneux ; 8 - Principaux affleurements triasiques ; 9 - Dépôts du Quaternaire ; 10 - Localité.

Geological and structural sketch of the North Aures area (Bureau, 1974).

1 - Anticline axis ; 2 - Synclinal axis ; 3 - Abnormal contact and inverse fault ; 4 - Fault ; 5 - Lower Cretaceous: dolomitic marl, sandstone and marl ; 6 - Albo-Aptian marl, sandstone and limestone ; 7 - Upper Cretaceous: limestone and calcareous marl ; 8 - Principal outcrop of Triassic formation. 9 - Quaternary sediments ; 10 - Lo-cality.

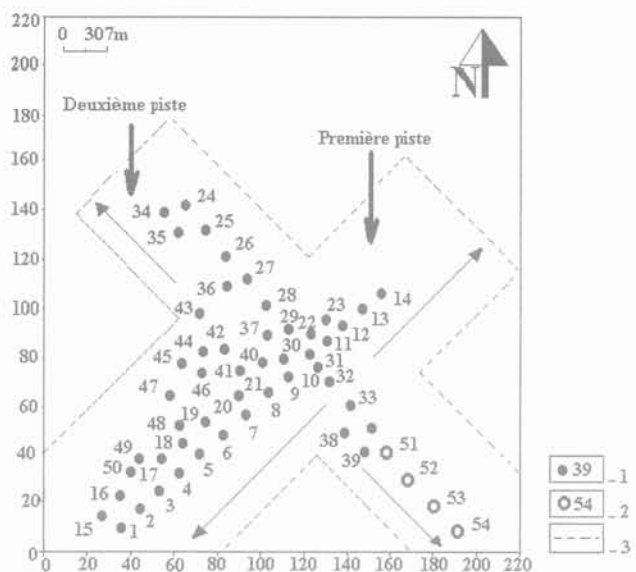


FIG. 3 Plan de sondages de reconnaissances géotechniques.

1 - Sondages réalisés par IAAI (1984);
2 - Sondages réalisés par la SAETI (1990);
3 - Limite du site.

Location of the boreholes of the geotechnical survey.

1 - Borehole carried out by IAAI (1984);
2 - Borehole carried out by SAETI (1990);
3 - Limit of the study area.

– les roches du Trias se présentent sous forme d'une masse confuse de marnes bariolées à masses gypseuses, îlots de dolomies broyées et cargneulisées de petits époutements de roches vertes de type « ophite »;

– le Jurassique est constitué par les dépôts du Dogger et du Malm qui sont représentés par une série marno-calcaire et marneuse de 100 m à 300 m d'épaisseur. Les dépôts du Lias sont constitués par des calcaires dolomitiques de 200 m d'épaisseur;

– le Crétacé est constitué par les roches du Crétacé inférieur et du Crétacé Supérieur. Le Crétacé inférieur est constitué par des marnes dolomitiques, marnes gréseuses, de calcaires dolomitiques et enfin, dans sa partie supérieure, par une alternance de grès et de marnes avec passages calcaires. Le Crétacé supérieur, lui, est constitué par des calcaires et une alternance de marnes grises et marno-calcaires;

– les dépôts du Miocène dont l'épaisseur varie de 125 m à 500 m, sont représentés par des conglomérats rouges polygéniques, marnes et grès d'âge Aquitano-Burdigalien, Burdigalien-Langhien, Tortorien inférieur et supérieur et Mio-Pliocène;

– le Quaternaire est constitué de sols salés autour du chott Gadaïne et de la Sebkhet Djendli qui forment de vastes surfaces surélevées de 0,5 m à 1 m au-dessus du niveau du chott (Fig. 1). Notons que l'altération des roches affleurantes fournit à la plaine des sédiments qui s'étendent au pied des massifs et se prolongent jusqu'à celle-ci.

La présence de structures plissées, cassantes et tangentielles a été signalée dans la région. Les anticlinaux et synclinaux sont de direction SW-NE (Fig. 2). Notons aussi que le site se trouve dans une zone de faible à moyenne sismicité (Djeddi et Baddari, 1998).

Au niveau de l'aérodrome de Batna, deux grands systèmes aquifères ont été identifiés. D'une épaisseur moyenne de 500 m, le premier est localisé dans les formations carbonatées calcaires de l'Aptien et les grès massifs fissurés du Barrémien qui plongent sous les dépôts du Miocène. Le second a une épaisseur de 200 m. Il est localisé dans les formations de surface ou subsurface du Mio-Quaternaire. L'altitude varie de 810 m à 822 m. Cette dernière permet des stagnations d'eau qui se forment au niveau des points bas. L'important cours d'eau de Oued El Madher traverse le bout Sud-Ouest de la première piste (Fig. 1). Les conditions hydrologiques du site ont été étudiées et un plan de drainage a été élaboré (Bourkouche, 1997).

3

Campagnes de reconnaissance géotechnique du site et nature du sol

La première campagne de reconnaissance a été réalisée par l'International Airports Authority of India (IAAI) en 1984. Les résultats de celle-ci ont fait l'objet d'expertises effectuées par la Société algérienne des études techniques des infrastructures (SAETI) en 1990 qui a réalisé un certain nombre de travaux complémentaires.

3.1

Campagne de reconnaissance de 1984

L'IAAI, en collaboration avec le Laboratoire des travaux publics de l'Est (LTPE) de Constantine, a effectué 50 sondages à la tarière (Fig. 3) dont 45 ont atteint la profondeur de 3 m et les 5 autres celle de 6 m. Au total 170 carottes perturbées, de 1 m de longueur, ont été prélevées et soumises à des essais essentiellement

TABEAU 1 Résultats des essais d'identifications (IAAI, 1984).
Results of identification tests (IAAI, 1984).

Variables	W _n (%)	W _L (%)	M&C (%)	γ_s g/cm ³	γ_h g/cm ³	γ_d g/cm ³	Id (%)
Nombre d'échantillons	170	170	170	156	156	170	156
Valeur minimale	2,00	27,00	0,00	2,05	1,52	1,33	45,00
Valeur maximale	27,40	64,00	100,00	2,68	2,13	1,88	94,00
Moyenne arithmétique	12,40	40,32	82,41	2,46	1,79	1,57	72,06
Écart-type	4,05	5,48	11,32	0,10	0,14	0,095	8,53

d'identification des paramètres physiques qui sont : la teneur en eau (w_n), la limite de liquidité (w_L), la granulométrie (M&C) représentant le taux de passés au tamis de 0,08 mm, le poids volumique des grains secs (γ_s), le poids volumique humide (γ_h), la densité sèche (γ_d) et l'indice de densité (I_d) (Tableau I). Les essais mécaniques ont été réalisés. Il s'agit des essais de compactage (w_{opt}), des essais sur le Californian Bearing Ratio (CBR) et des essais sur le gonflement du sol (GO) (Tableau III).

Durant cette campagne, des échantillons prélevés à la surface du sol, sur 1 m d'épaisseur, ont été analysés sur la matière organique dont la teneur varie de 3,4 à 5,1 % (IAAI, 1984). L'étude de la classification du sol de ce site, à l'aide de méthodes classiques sur la base de la granulométrie et du diagramme de plasticité de Casagrande (Khalfaoui, 2002), a montré que celui-ci est pratiquement homogène sur la profondeur testée qui est de 3 m. Les analyses granulométriques ont montré que le taux moyen du passé au tamis de 0,08 mm est de 82,41 % (Tableau I). C'est donc un sol fin essentiellement argileux peu plastique et faiblement organique.

3.2

Travaux de reconnaissance réalisés par la SAETI en 1990

En 1990, la SAETI, en collaboration avec l'organisme national de Contrôles techniques des travaux publics (CTTP) d'Alger et dans le cadre d'une expertise, a réalisé quatre sondages carottés de 15 m de profondeur chacun et numérotés de 51 à 54 (Fig. 3). Des essais d'identification des paramètres physiques w_n , w_L , γ_d , le coefficient de compressibilité (C_c), le coefficient de gonflement (C_s), l'angle du frottement interne (Φ) et la cohésion non drainée (C_u) ont été effectués sur un certain nombre d'échantillons (Tableau II).

TABEAU II Résultats des essais d'identification géotechnique sur les échantillons de carotte (SAETI, 1990).
Results of the geotechnical tests carried out during the second survey (SAETI, 1990).

Variables	w_n (%)	w_L (%)	γ_d g/cm ³	C_c —	C_s —	Φ (°)	C_u (bars)
Nombre d'essais	14	14	14	9	9	9	9
Valeur minimale	10,66	38,00	1,75	0,10	0,03	3,00	0,06
Valeur maximale	18,20	43,66	1,86	0,21	0,06	7,00	0,66
Moyenne arithmétique	15,54	40,96	1,75	0,12	0,04	3,38	0,12
Écart-type	3,38	2,43	0,05	0,59	0,01	1,05	0,02

TABEAU III Statistique des valeurs moyennes des résultats des essais géotechniques (IAAI, 1984).
Statistics of the mean values of the geotechnical tests results.

Variables	w_n (%)	w_L (%)	M&C (%)	γ_s g/cm ³	γ_h g/cm ³	γ_d g/cm ³	I_d (%)	γ_{dep} g/cm ³	w_{opt} (%)	CBR —	GO cm
Nombre d'essais	54	54	54	50	50	54	50	49	49	19	19
Valeur minimale	8,17	33,00	56,33	2,15	1,62	1,42	58,33	1,69	8,80	2,30	1,00
Valeur maximale	22,80	58,00	97,30	2,57	2,10	1,87	90,30	1,94	18,20	8,50	4,30
Moyenne arithmétique	12,41	40,32	82,43	2,46	1,79	1,57	72,06	1,81	14,04	4,56	2,67
Écart-type	3,08	4,11	5,90	0,08	0,12	0,08	6,82	0,06	1,70	1,61	1,07

3.3

Valeurs moyennes des essais d'identification géotechnique dans les sondages

Afin d'optimiser les traitements de sol pour uniformiser le comportement de la piste et de se prononcer sur la qualité de la reconnaissance, il était nécessaire de ramener le problème à deux dimensions (2D) en calculant les valeurs moyennes de ces paramètres dans les sondages et d'étudier la variabilité latérale des paramètres géotechniques et les déformations des surfaces des pistes. Pour cela, nous avons calculé les valeurs moyennes des paramètres géotechniques (Tableau III). Le paramètre qui a été utilisé pour mesurer la déformation de cette surface est le tassement S dans les sondages ; il a été estimé à l'aide de l'égalité (1) ci-dessous, pour toute la couche d'argile peu plastique H_0 épaisse de 3 m.

$$S = \Delta H = \frac{H_0}{1 + e_0} Cc \log \left[\frac{\sigma'_{v0} + \Delta \sigma}{\sigma'_{v0}} \right] \quad (1)$$

avec :

$$\sigma'_{v0} = \gamma_d \cdot H_0 \quad (2)$$

$$\text{et } \Delta \sigma = \gamma_r \cdot H_r = 0,5 \text{ bar d'après SAETI (1990)} \quad (3)$$

$$Cc = 0,009 (w_L - 10) \text{ d'après Costet et Sanglérat (1975)} \quad (4)$$

où :

S : le tassement du sol dans le sondage ;

H_0 : épaisseur de la couche du sol ($H_0 = 3$ m) ;

σ'_{v0} : contrainte effective de préconsolidation ;

$\Delta \sigma$: charge due au remblai ;

e_0 : indice des vides de la couche qui est égale à 0,59 d'après IAAI (1984) ;

Cc : coefficient de compressibilité ;

w_L : limite de liquidité du sol ;

γ_d : la densité sèche du sol ;
 γ_r : poids volumique du remblai ;
 H_r : l'épaisseur – $H_r = 2,5$ m.

En remplaçant les différents paramètres par leurs valeurs, on obtient :

$$S = \frac{H_0}{1 + e_0} [0,009 \cdot (w_L - 10)] \cdot \log \left[\frac{\gamma_d \cdot H_0 + 0,5}{\gamma_d \cdot H_0} \right] \quad (5)$$

L'égalité (5) montre que S dépend à la fois de w_L et de γ_d . Il est donc plus simple de considérer S comme une variable régionalisée et d'étudier sa variabilité spatiale que celles de w_L et γ_d .

4

Méthodes statistiques et géostatistique utilisées

Les deux principales méthodes utilisées sont l'analyse en composantes principales normées (ACP) et la procédure géostatistique de krigeage ordinaire.

4.1

L'analyse en composantes principales (ACP)

L'analyse en composantes principales est une méthode de traitement de données multivariées. Le principe de l'ACP est bien décrit par plusieurs auteurs (Lebart *et al.*, 1979 ; Benzecri *et al.*, 1980 et Volle, 1981). Cette méthode est souvent utilisée dans le domaine des sciences de la terre (Mezghache, 1989 ; Khalfaoui, 2002). C'est une méthode factorielle qui permet de construire des facteurs considérés comme de nouvelles variables indépendantes ou non corrélées sur le plan statistique, facilitant l'étude des relations entre les variables initiales. Le principal objectif est d'extraire, sous une forme condensée, la plus grande part possible de l'information contenue dans les données, qu'elle soit relative aux liaisons entre variables ou aux liaisons entre individus (essais). Les principales étapes pour une ACP sont :

- 1) le calcul de la matrice de corrélation et la recherche des facteurs de charge ;
- 2) le tracé et l'interprétation des cercles de corrélations ;
- 3) et enfin la cartographie, éventuellement, des facteurs des individus (scores).

4.2

La procédure géostatistique de krigeage ordinaire

La géostatistique ou théorie des variables régionalisées a pour objet l'étude des fonctions aléatoires. Matheron (1962a et 1962b) a introduit la notion de variables régionalisées pour quantifier un phénomène à caractère aléatoire manifestant une structure de variabilité spatiale comme par exemple les paramètres géotechniques et le tassement (S). Il a donné un fondement théorique à l'analyse probabiliste des variables régionalisées. La géostatistique a déjà été utilisée dans plusieurs travaux de recherche en géotechnique (Chiasson *et al.*, 1995 ; Bolle, 2000 ; Marache *et al.*, 2002).

La prise en compte des corrélations spatiales des paramètres de reconnaissance, par l'utilisation des variogrammes, permet leur estimation sans 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. Cette estimation peut se faire à l'aide du 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. Les valeurs des variances de krigeage et leur répartition spatiale permettent donc de se prononcer sur la qualité du dispositif de reconnaissance.

4.2.1

Le 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 $\gamma(h)$; cependant afin d'éviter la confusion avec le poids volumique humide noté déjà par γ_h , nous la désignerons ici par $g(h)$. 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 $x + h$:

$$g(h) = (1/2) E[(Z(x) - Z(x + h))^2] \quad (6)$$

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 :

$$g^*(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad (7)$$

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 (Fig. 4).

4.2.2

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

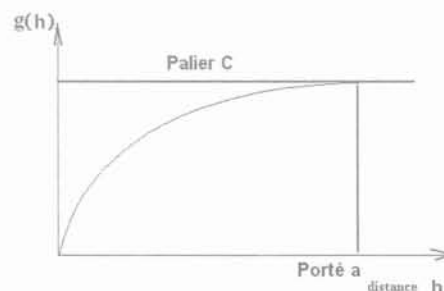


FIG. 4 Représentation graphique d'un variogramme.
Graphical representation of a variogram.

définition en utilisant les mesures expérimentales Z_i et l'information structurale représentée par le variogramme de la régionalisation étudiée (Journel and Huijbregts, 1978). On a :

$$Z^*(x) = \sum_{i=1}^N \lambda_i Z_i \quad (8)$$

Il s'agit donc de calculer les pondérateurs λ_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

$$E[Z(x)] = E[Z(x+h)] = \text{constante} = \text{moyenne} \quad (9)$$

et :

$$E[Z_v] = E[Z_i] = \text{constante} = \text{moyenne} \quad (10)$$

La condition de non biais est :

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

$$\text{Var}[Z(x)] = \text{Var}[Z(x+h)] \quad (11)$$

– la somme des pondérateurs soit égale à 1 :

$$\sum_{i=1}^N \lambda_i = 1 \quad (12)$$

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 λ_i et μ le paramètre de Lagrange. Ce système est dit « système de krigeage ordinaire » :

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^N \lambda_i g(x_j, x_i) + \mu = g(x_j, V); \text{ avec } i = 1..N \text{ et } j = 1..N \\ \sum_{i=1}^N \lambda_i = 1 \end{cases} \quad (13)$$

avec :

$$g(x_j, V) = \frac{1}{V} \int g(x_j, x_k) dx_k \quad (14)$$

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_j les points de mesures. A chaque valeur Z_k estimée par krigeage ordinaire, est associée sa variance de krigeage σ_k^2 qui est égale à :

$$\sigma_K^2 = \sum_{i=1}^N \lambda_i g(x_i, V) - g(V, V) + \mu \quad (15)$$

et où :

$$g(V, V) = \frac{1}{V^2} \iint g(x_k - x_l) dx_k dx_l \quad (16)$$

5

Résultats obtenus sur le site de l'aérodrome de Batna

5.1

Analyse en composantes principales (ACP)

L'ACP a été faite sur les valeurs moyennes des paramètres $w_{\eta'}$, $w_{L'}$, $M\&C$, $\gamma_{s'}$, $\gamma_{h'}$, $\gamma_{d'}$, $I_{d'}$, $\gamma_{dopt'}$, $w_{opt'}$ et S . La matrice de corrélations simples a été calculée (Tableau IV). Les facteurs de charge ont été calculés et les cercles de corrélations ont été tracés (Fig. 5). Ces

derniers montrent que le facteur F1 est corrélé positivement à S et négativement à $w_{\eta'}$ et $\gamma_{h'}$. Nous déduisons donc que la valeur du tassement est forte dans les secteurs où la teneur en eau et le poids volumique humide sont relativement faibles. La carte des facteurs des individus (scores) de F1 a permis de localiser ces secteurs (Fig. 6) qui doivent subir un traitement spécifique pour que le comportement de la piste soit uniforme.

5.2

Variographie du tassement S

Le calcul du variogramme expérimental de surface de S et son ajustement (Pannatier, 1995) (Fig. 7) montre une anisotropie géométrique avec un grand axe de direction 45° et un coefficient d'anisotropie égale à 0,56. Ceci montre déjà que la maille de reconnaissance n'aurait pas dû être carrée (200 m x 200 m) mais de forme rectangulaire avec un rapport largeur sur longueur égal au moins à ce coefficient d'anisotropie. Le variogramme expérimental directionnel ($D = 45^\circ$) est calculé et ajusté par un schéma sphérique (Fig. 8) avec un effet de pépité $C_0 = 3,25 \text{ cm}^2$, un palier $C = 24,75 \text{ cm}^2$ et une portée $a = 609,0 \text{ m}$. Ceci donne :

$$g^*(h) = 3,25 + 24,75 \cdot g_{sph}(609 \text{ m}) \quad (15)$$

où $g_{sph}(609 \text{ m})$ est le variogramme sphérique relatif de palier $C = 1$ et de portée a à 609 m. Il est égale à :

$$g_{sph} = \frac{3h}{2a} - \frac{1h^3}{2a^3} \dots \forall h < a \dots \dots g_{sph} = 1 \dots \forall h \geq a \quad (16)$$

La faible valeur de C_0 par rapport à C ($\frac{C_0}{C} = \frac{3,25}{24,75} = 0,13$) peut être interprétée comme étant due à une grande précision dans les mesures des paramètres $w_{L'}$ et γ_d qui ont été utilisés pour le calcul de S .

5.3

Krigeage de S et cartographie

Le variogramme directionnel ($D = 45^\circ$) de S a été utilisé pour le krigeage ordinaire de S aux nœuds d'une maille régulière de 200 m x 200 m. La moyenne des valeurs krigées est de 30,87 cm avec une variance de dispersion moyenne de krigeage égale à 9,93 cm^2 . La carte des isovaleurs krigées de S (Fig. 9) montre que celles-ci varient de 18 cm à 35 cm au niveau de la première piste et de 18 cm à 30 cm au niveau de la seconde piste. Le site de l'aérodrome de Batna est donc constitué d'un sol avec des secteurs à fort tassement et d'autres à faible tassement et par conséquent le traitement et le renforcement de la piste doivent être différentiels. La carte de variance de krigeage (Fig. 10) montre que cette dernière est pratiquement la même sur tout le site : il n'y a donc pas de secteur sous-reconnu. L'erreur relative de l'estimation de S est de 20% au maximum avec un niveau de confiance de 95% – l'erreur sur l'estimation peut être considérée comme faible. La répartition latérale des sondages est donc adéquate cependant si cette erreur devrait être plus faible alors le resserrement de la maille devrait être uniforme sur tout le site. La géostatistique permet, sur la base de la précision voulue, le calcul et la détermination du type de maille nécessaire.

TABLEAU IV

Matrice de corrélations simples des valeurs moyennes des paramètres géotechniques.
Simple correlation matrix of the mean values of the geotechnical parameters.

	W_n	W_L	M&C	γ_d	γ_h	γ_s	I_d	γ_{dopt}	W_{opt}	S
W_n	1,00									
W_L	0,17	1,00								
M&C	0,11	0,45	1,00							
γ_d	-0,27	0,24	-0,19	1,00						
γ_h	0,38	0,07	-0,06	-0,36	1,00					
γ_s	-0,01	0,06	-0,05	-0,13	0,07	1,00				
I_d	-0,30	0,01	0,05	0,00	-0,12	0,64	1,00			
γ_{dopt}	-0,27	0,09	-0,23	0,15	0,05	0,14	-0,21	1,00		
W_{opt}	0,18	0,20	0,20	-0,04	-0,33	-0,11	0,07	-0,26	1,00	
S	-0,64	0,58	0,12	0,07	-0,28	0,13	0,19	0,27	0,01	1,00

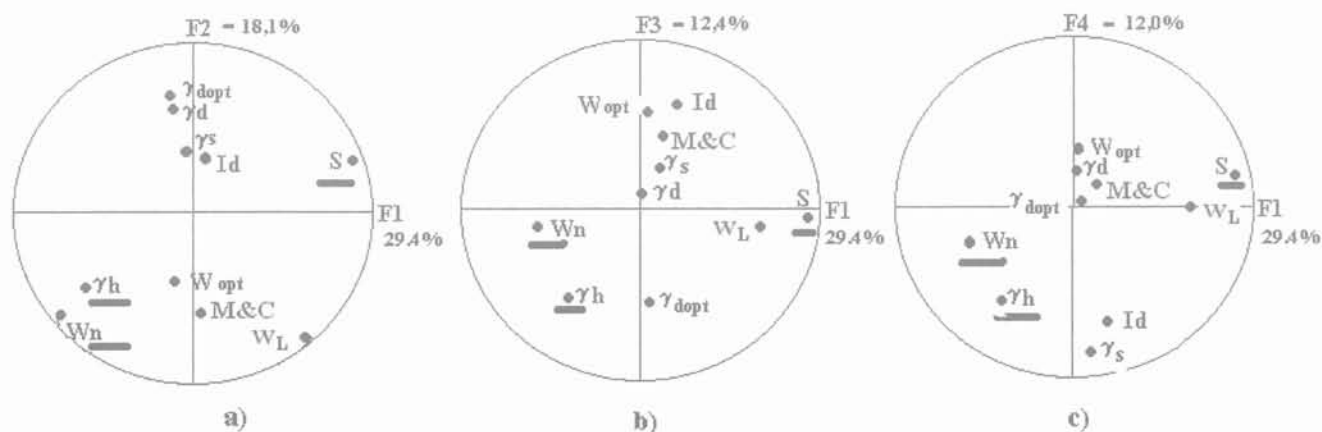


FIG. 5 Cercle de corrélation de l'ACP des valeurs moyennes des paramètres géotechniques.
Correlation circle of the PCA of the mean values of the geotechnical parameters.

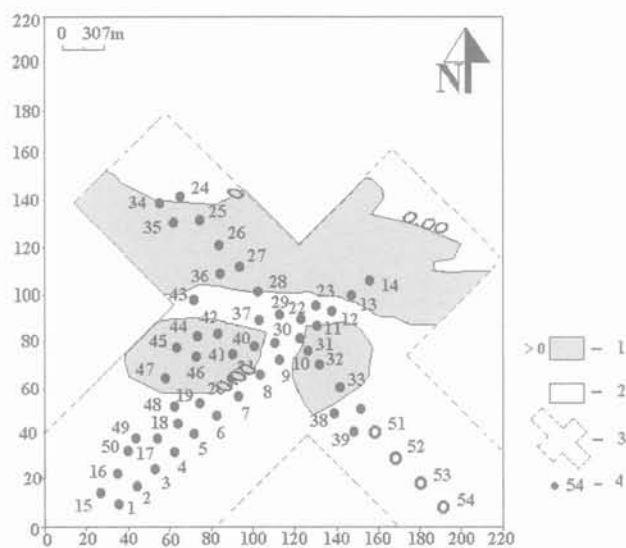


FIG. 6 Carte du facteur des individus (score) F1.
1 – Sols à fort facteur score ($> 0,0$) : à fortes valeurs en S et faibles valeurs en w_n et γ_h ;
2 – Sol à faible facteur score ($< 0,0$) : à faibles valeurs en S et fortes valeurs en w_n et γ_h ;
3 – Limite du site ; 4 – Sondage et son numéro.

Map of the factor score F1.

1 – Soil with high value of score factor ($> 0,0$) : high values of S and low values of w_n and γ_h ;
2 – Soil with low value of score factor ($< 0,0$) : low values of S and high values of w_n and γ_h ;
3 – Limit of the study area ; 4 – Borehole and its number.

6

Conclusion et recommandations

Le site de l'aérodrome de Batna a été reconnu par un total de cinquante quatre (54) sondages mécaniques. La profondeur moyenne testée est de 3 m. Seuls les quatre sondages numérotés de 51 à 54 avaient une profondeur variant de 1 à 15 m. Le site est constitué d'un sol fin argileux peu plastique et faiblement organique. Il est homogène sur la profondeur testée.

L'ACP des valeurs moyennes montre que le tassement S est corrélé négativement à w_n et γ_h . Les cercles de corrélations facteurs-paramètres géotechniques ont montré que le facteur de charge F1 oppose S à w_n et γ_h . La valeur du tassement est donc forte dans les secteurs du site où la teneur en eau et le poids volumique humide sont faibles. Il faudrait en tenir compte lors des travaux de constructions et de renforcement des pistes, afin d'éviter le risque de tassement différentiel de celles-ci.

Le calcul du variogramme expérimental de surface de S dans les sondages a montré une anisotropie avec un grand axe de direction 45° N-E et un coefficient de 0,56. Cette anisotropie peut être due à la mise en place des dépôts qui s'est effectuée dans la direction du grand axe c'est-à-dire nord-est/sud-ouest. Le variogramme directionnel ($D = 45^\circ$) expérimental a été ajusté à l'aide d'un schéma sphérique qui a un effet de pépite $C_0 = 3,25 \text{ cm}^2$, un palier $C = 24,75 \text{ cm}^2$ et une portée $a = 609 \text{ m}$. La faible valeur de C_0 par rapport à C peut être interprétée comme témoin de la bonne qualité des

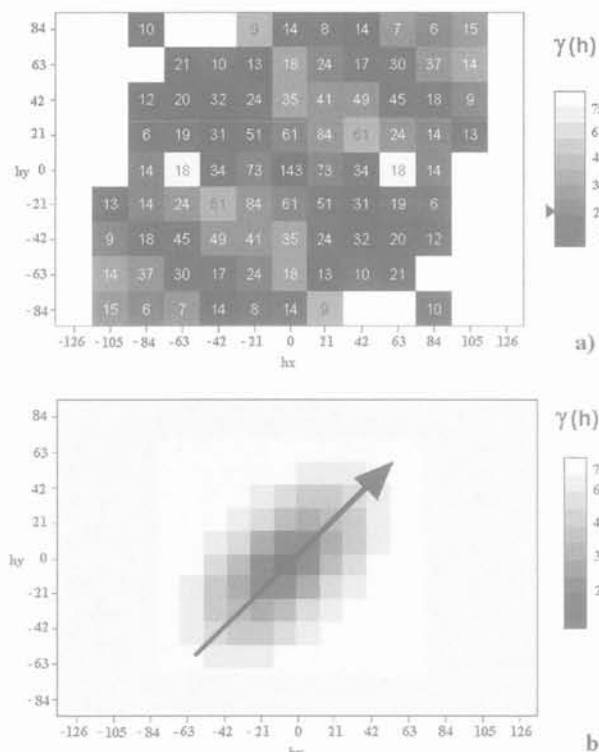


FIG. 7 Variogramme de surface.

a) Variogramme expérimental de surface de S présentant l'anisotropie avec un grand axe de direction 45°. Le nombre à l'intérieur d'un carré représente le nombre de couples $[Z(x); Z(x+h)]$; b) « Ajustement » du variogramme de surface.

Surface variogram.

a) Experimental variogram surface of S showing anisotropy with 45° directed big axis. Number in square represents number of couple $[Z(x); Z(x+h)]$; b) Adjusted variogram surface.

essais d'identification des paramètres physiques w_L et γ_d qui ont servi à calculer S. Le krigeage ordinaire de S au nœud de maille de 200 m x 200 m montre que les valeurs de S krigées varient de 18 cm à 35 cm avec une moyenne 30,87 cm. La cartographie de ces valeurs montre que S est très variable d'un endroit à un autre. Les zones de fort tassement ont été localisées et elles doivent être prises en compte lors du renforcement des

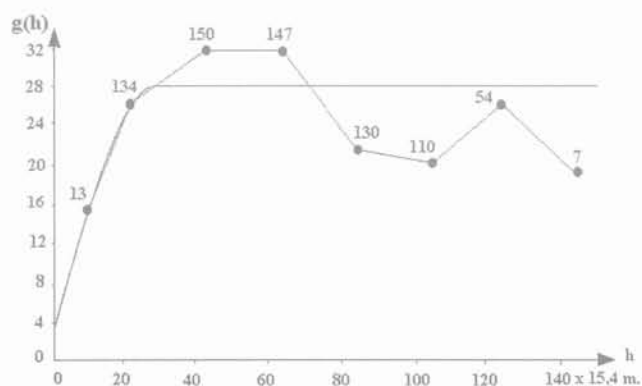


FIG. 8 Variogramme directionnel du tassement (S).

Directional variogram of the settlement (S).

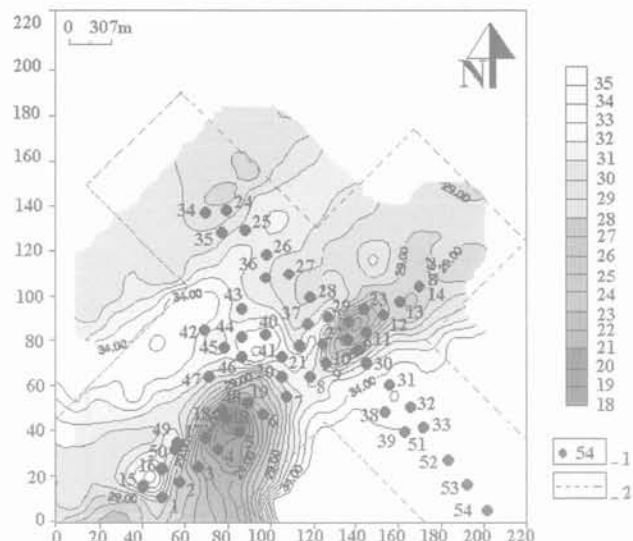


FIG. 9 Carte d'isovaleurs krigées du tassement S. 1 – Numéro du sondage; 2 – Limite du site. Map of the kriged isavalue of the settlement S. 1 – Borehole number; 2 – Limit of the study area.

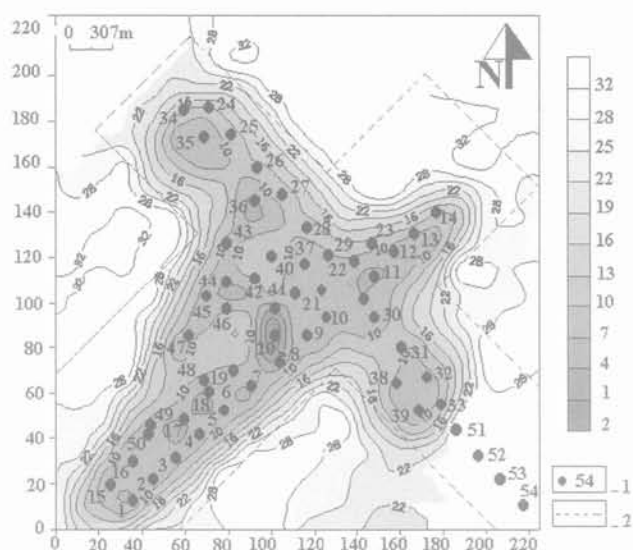


FIG. 10 Carte d'isovariance de krigeage du tassement S.

1 – Numéro du sondage; 2 – Limite du site. Map of the kriging isovariance of the settlement S. 1 – Borehole number; 2 – Limit of the study area.

pistes pour assurer un comportement uniforme à ces dernières. La variance moyenne de krigeage est de 9,93 cm²; ce qui donne une erreur relative de 20 % au maximum pour un niveau de confiance de 95 % correspondant au standard gaussien $2\sigma_E$. La cartographie des variances de krigeage montre que ces dernières sont pratiquement uniformes et que par conséquent il n'y a pas de zones sous-reconnues. Cependant, si la précision dans l'estimation des paramètres géotechniques devait être plus grande, alors le resserrement de la maille doit être uniforme sur tout le site et la géostatistique permet alors de calculer ce resserrement en fonction de la variance d'estimation souhaitée.

- Benzecri J.-P. – *L'analyse des données : la taxinomie*. Dunod, Paris, 1980, 2^e édit., 632 p.
- Bolle A. – Étude et prise en compte de la variabilité spatiale. *Revue française de géotechnique* 93, 2000, p. 55-66.
- Bourkouche R. – *Étude de la salinité actuelle d'une partie de la plaine d'El Madher et calcul d'un réseau de drainage*. Thèse de magister en pédologie. Institut d'agronomie, Université de Batna, 1997, 120 p.
- Bureau D. – Principaux traits de la structure des monts de Batna, Belezema (Algérie). *Bull. Serv. Géol.*, France, n° 2, 7-12, 1970, 210 p.
- Bureau D. – Le Crétacé inférieur des monts de Batna (Aurès). Lithologie et premières observations lithostratigraphiques. *Bull. Serv. Géol.*, France, n° 13, 3-4, 1971, p. 374-385.
- Bureau D. – Figures et structures sédimentaires du Crétacé inférieur des monts de Batna et Belezma, Algérie. *Bull. Serv. Géol. de France* 151 p.
- Bureau D. – Conditions de sédimentation du Valanginien inférieur au Nord de l'Aurès. *Bull. Soc. Hist. Nat. Afr. Nord*, Alger, Fasc. 3-4, 1974, p. 151-158.
- Chiasson P., Lafleur J., Soulié M., Law K.T. – Characterizing spatial variability of a clay by geostatistics. *Revue canadienne de géotechnique* 32 (1), 1995, p. 1-10.
- Costet J., Sanglerat G. – *Cours pratique des mécaniques des sols - plasticité et calcul du tassement*, Dunod, Paris, t. I, 1975, 285 p.
- Djeddi M., Baddari K. – *Élément de séismologie*. Éd. OPU, Alger, 1998, 456 p.
- IAAL – *Rapport géotechnique de l'International Airport Authority of India, New Delhi*. Rapport interne, Direction des travaux publics de la wilaya de Batna, 1984, 150 p.
- Journal A.G., Huijbregts C.J. – *Mining geostatistics*. Academic Press, London, 1978, 600 p.
- Khalifaoui S. – *Étude des paramètres physico-mécaniques des sols de l'aérodrome de Batna : typologie géotechnique, géostatistique et cartographie automatique*. Mémoire de magister, Université Badji Mokhtar, Annaba, Algérie, 2002, 70 p.
- Lebart L., Morineau A. et Fénelon J.-P. – *Traitement des données statistiques, méthodes et programme*, Dunod, Paris, 1979, 510 p.
- Marache A., Riss J., Gentier S., Chiles J.-P. – Characterisation and reconstruction of a rock fracture surface by geostatistics. *International Journal for Numerical and analytical Methods in Geomechanics* 26 (9), 2002, p. 873-896.
- Mathéron G. – *Traité de géostatistique appliquée*. Mém. BRGM, 14, 1962, t. I, 333 p., t. II, 306 p.
- Mezghache H. – *Cartographie automatique et interprétation géostatistique d'une campagne de prospection géochimique sol. Application à la zone mercurielle Nord numidique (Algérie)*. Thèse. Doc. INPL, Nancy, France, 1989, 178 p.
- Pannatier Y. – « Variowin » : software of spatial data analysis in 2D. University of Lausanne, Switzerland, 1995, 72 p.
- SAETI – *Rapport de l'expertise géotechnique du site de l'aérodrome de Batna*. Rapport interne, Direction des travaux publics de la wilaya de Batna, 1990, 20 p.
- Vila J.-M. – *La chaîne alpine de l'Algérie orientale et confins algéro-tunisiens*. Thèse doctorat en sciences, Université Pierre et Marie Curie, Paris VI, 1980, 663 p.
- Volle M. – *Analyses des données*. Economica, Paris, 1981, 317 p.