

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ ABOUBAKR BELKAÏD -TLEMCEM

FACULTÉ DE TECHNOLOGIE



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme de MASTER**

En : GENIE CIVIL

Spécialité : GEOTECHNIQUE

Par : SEDIRI AMAR

Sujet

Variabilité géostatistique des paramètres de

Pénétrromètre standard CPT

(Site de mostaganem)

Enseignant :

M^{me} BENAHCILIF S.

Encadrante

Univ.Tlemcen

M^{me} BENADDA Z

Présidente

Univ.Tlemcen

M^{me} ROUSSAT N

Examinatrice

Univ.Tlemcen

Année Universitaire : 2025 – 2026

Remerciements

En premier lieu, j'exprime mes profonds remerciements à ma famille surtout à mes parents, mes frères, mes sœurs et mes amis et tous ceux qui m'ont apporté leurs aides et leurs soutiens pour la réalisation de cette mémoire.

J'exprime également mes remerciements à :

- Mme SOUAD BENHACHILIF pour son aide et son encadrement et sa confiance, sa rigueur scientifique, ses conseils, malgré les occupations et les responsabilités qu'elle assume.
- Mme BENADLA Z enseignant au département de génie civil pour m'avoir fait l'honneur en acceptant la présidence du jury.
- Mme ROUISSAT N enseignant au département de génie civil d'avoir accepté d'examiner mon travail.
- Le chef de département Mr TALEB OMAR pour son soutien et sa collaboration.
- Toute l'équipe pédagogique du département de génie civil pour tous les efforts fournis tout au long de notre formation académique.

Dédicaces

Avec grande plaisir, je dédie ce modeste travail :

À mon cher père pour son affection, son soutien.

À ma chère mère. Pour son amour, ses encouragements.

À mes frères

À mes adorables sœurs

À tous les membres de ma famille

Sans oublier mes amies

Résumé

L'analyse géospatiale par krigeage est un outil utile pour la caractérisation initiale d'un site lorsqu'on travaille avec des ensembles de données CPT incomplets, car elle donne systématiquement de bons résultats pour l'estimation des paramètres géotechniques sur des sites non échantillonnés.

Cette analyse permettant de reproduire fidèlement les couches de sol et les changements brusques de résistance de pointe et du frottement latérale issu du résultat de l'essai CPT.

Elle permet de quantifier les corrélations spatiales et les incertitudes grâce aux variogrammes, améliorant ainsi la fiabilité des modèles de sol et la sécurité des conceptions géotechniques.

Après suppression de certains essais CPT, une tentative de reproduction de ces points a été réalisée à l'aide des résultats obtenus par krigeage.

Les estimations ainsi générées se sont révélées globalement satisfaisantes, avec une bonne concordance entre les valeurs prédites et les mesures réelles, ce qui confirme l'efficacité de la méthode pour reconstituer des données manquantes et assurer une continuité spatiale fiable dans la caractérisation des paramètres géotechniques du site.

Mots-clés : Géotechnique, Pénétrömètre statique au cône (CPT), Variabilité, géostatistique, Analyse spatiale, Krigeage, Variogramme, Paramètres géotechniques, Résistance de pointe (q_c), Frottement latéral (f_s), Classification des sols, Site de Mostaganem

ملخص

يُعدّ التحليل الجغرافي المكاني بطريقة الكريغينغ من الأدوات ذات الكفاءة العالية في التوصيف الأولي للمواقع الجيوتقنية، لاسيما عند التعامل مع مجموعات بيانات CPT غير المكتملة.

إذ تُظهر هذه المنهجية قدرة واضحة على توفير تقديرات دقيقة للمعاملات الجيوتقنية في المناطق غير المسبورة، مع تحقيق أداء ثابت وموثوق.

ويسمح هذا النوع من التحليل بإعادة تمثيل طبقات التربة وتموضعها بدقة، بما في ذلك التغيرات المفاجئة في مقاومة الاختراق (qc) والاحتكاك الجانبي (fs) المستخلصة من نتائج الاختبارات.

كما يُساهم استخدام الفاريوغرام في تقدير الارتباطات المكانية وتحديد مستويات عدم اليقين المرتبطة ببنية التربة، الأمر الذي يعزز موثوقية النماذج الجيوتقنية ويُحسن سلامة التصميم الهندسية.

وبعد استبعاد بعض اختبارات CPT عمدًا، تم تنفيذ محاولة لإعادة تقدير النقاط المحذوفة اعتمادًا على نتائج الكريغينغ، وقد أظهرت التقديرات المُتحصّل عليها تطابقًا مرضيًا مع القيم المقاسة ميدانيًا، مما يؤكد فعالية هذه المنهجية في استكمال البيانات الناقصة وضمان استمرارية مكانية دقيقة في توصيف الخواص الجيوتقنية للموقع.

الكلمات المفتاحية: الهندسة الجيوتقنية ' اختبار الاختراق المخروطي الساكن (CPT) ' التباين الجيواحصائي ' التحليل المكاني ' طريقة الكريغينغ ' الفاريوغرام ' الخصائص الجيوتقنية ' مقاومة رأس المخروط (qc) ' الاحتكاك الجانبي (fs) ' تصنيف التربة ' موقع مستغانم .

ABSTRACT

Geospatial analysis using kriging is a valuable tool for the initial characterization of a site, particularly when working with incomplete CPT datasets, as it consistently provides reliable results for estimating geotechnical parameters in unsampled areas.

This approach makes it possible to accurately reproduce soil layering as well as the abrupt variations in cone resistance and sleeve friction observed in CPT results.

It also enables the quantification of spatial correlations and uncertainties through variograms, thereby improving the reliability of soil models and enhancing the safety of geotechnical design.

After intentionally removing certain CPT tests, an attempt was made to reconstruct these missing data points using the results generated by kriging.

The resulting estimates proved to be generally satisfactory, showing good agreement between the predicted values and the actual measurements.

This confirms the effectiveness of the kriging method in reconstructing missing data and ensuring a reliable spatial continuity in the characterization of the site's geotechnical parameters.

Keywords: Geotechnical engineering, Cone Penetration Test (CPT), Geostatistical , variability , Spatial analysis, Kriging, Variogram, Geotechnical parameters, Cone tip resistance (q_c), Sleeve friction (f_s), Soil classification, Mostaganem site .

Table des matières

Introduction Générale :	12
Chapitre I : Étude des sols et techniques d'exploration par le test CPT.....	13
1 Généralités sur les sols :	14
1.1 Certains types de sols :	14
1.1.1 Sols sableux :	14
1.1.2 Sols argileux :	14
1.1.3 Sols limoneux :	15
1.1.4 Sols calcaires :	16
2 Les essais in situ :	17
2.1 Définition et rôle des essais in situ :	17
2.2 Avantages des essais in situ :	18
2.3 Inconvénients :	18
3 Principe du test de pénétration statique au cône (CPT) :	18
3.1 Description de l'équipement :	19
3.2 Paramètres mesurés :	19
3.3 Le rapport de friction :	20
3.4 La classification des sols selon Robertson :	20
4 Procédure de réalisation du test de pénétration statique au cône (CPT) :	21
4.1 Normes applicables :	21
4.2 Conditions d'exécution sur le terrain :	21
5 Conclusion :	22
Chapitre II : La Géostatistique.....	23
1 Introduction :	24
2 Définition de la géostatistique :	24
3 Historique et fondements de la géostatistique :	24
4 Domaines d'application de la géostatistique :	25
5 Concepts fondamentaux de la géostatistique :	26
5.1 Variable régionalisée :	26

5.2	Stationnarité :	26
5.3	Covariance spatiale :	26
5.4	Variogramme :	27
5.4.1	variogramme expérimental :	27
5.4.2	variogramme théorique :	29
5.4.3	L'Effet de pépite :	30
5.4.4	La portée :	30
5.5	Modèles de variogramme :	31
5.5.1	L'effet de pépite :	31
5.5.2	Modèle sphérique :	32
5.5.3	Modèle exponentiel :	32
5.5.4	Modèle gaussien :	33
5.6	Le krigeage :	33
5.6.1	Types de krigeage :	34
6	Logiciel GS+ :	37
6.1	Analyse de variabilité spatiale :	37
6.2	Ajustement de modèles de variogrammes :	37
6.3	Krigeage pour l'interpolation spatiale :	37
6.4	Évaluation de l'incertitude :	38
6.5	Applications pratiques en géotechnique :	38
7	CONCLUSION :	38
Chapitre III: ETUDE DE CAS (site de mostaganem).....		39
1	INTRODUCTION :	40
2	PRESENTATION DE SITE :	40
3	LOCALISATION :	40
4	CONTEX SISMIQUE :	41
5.	CONTEXTE GÉOLOGIQUE :	42
5.1.	GÉOLOGIE RÉGIONALE :	42
5.2.	GÉOLOGIE LOCALE :	42
6.	PROGRAMME DES RECONNAISSANCES GÉOTECHNIQUES :	42
7.	PRESENTAION DES RESULTAT CPT DU SITE :	43

7.1.	Les résultats des essais au pénétromètre statique (CPT) :.....	43
7.1.1	Les paramètres mesures :	43
7.1.2	Rapport de friction Rf (%) :	46
7.1.3	Classification des sols selon Robertson :	48
7.1.4	Interprétation des résultats :	55
8	L'Analyse Géospatiale Prédictive de la Variabilité des CPT :	55
8.1	Méthodologie :	55
8.2	Résultats et discussion :.....	56
8.2.1	Analyse Statistique :.....	56
8.2.2	Histogramme :.....	57
8.2.3	Transformations :	57
8.2.4	Modélisation du Variogramme de qc et fs :	57
8.2.5	Variogramme Anisotrope :.....	58
8.2.6	Validation Croisée :.....	59
8.2.7	Analyse par Krigeage :.....	60
8.3	Comparaison des résultats :.....	62
9	Conclusion :.....	64
	Conclusion générale :	65
	Références Bibliographiques :.....	66

Table des figures

Figure I. 1: Sols sableux	14
Figure I. 2 : Sols argileux.....	15
Figure I. 3 : Sols limoneux.....	16
Figure I. 4 : Sols calcaires.....	17
Figure I. 5 : Le test de pénétration au cône (CPT).....	19
Figure II. 1 : Représentation schématique des points de mesure de la variable.	27
Figure II. 2: Schéma de calcul du variogramme expérimental.	28
Figure II. 3: Ajustement d'un modèle théorique (courbe) à un modèle expérimental (croix).28	28
Figure II. 4: Graphe d'un variogramme expérimental et son modèle d'ajustement.	29
Figure II. 5: Schéma type d'un variogramme.	Erreur ! Signet non défini.
Figure II. 6 : variogramme forte irrégularité (pépité pure).	31
Figure II. 7 : Type d'un modèle de variogramme sphérique.	32
Figure II. 8 : Type d'un modèle de variogramme exponentiel.	33
Figure II. 9 : Type d'un modèle de variogramme Gaussien.....	33
Figure III.. 1 : localisation de projet par l'application (google earth).....	40
Figure III.. 2 : Dunes de sable de mer	41
Figure III.. 3: Carte de zonage sismique du territoire national-RPA99 version 2003.....	41
Figure III.. 4: Le plan d'implantation des sondages pour les essais CPT.	43
Figure III.. 5: Disposition des forages avec coordonnées dans un système cartésien.	56
Figure III.. 6: Histogramme du fs et de qc.	57
Figure III.. 7: Variogramme anisotrope de fs et de qc.....	59
Figure III.. 8: Validation croisée du modèle semi-variogramme pour le frottement latéral et la résistance de pointe du cône.	60
Figure III.. 9: Carte de Contours des valeurs de frottement latéral et de résistance de pointe du cône obtenues par analyse de krigeage.....	61
Figure III.. 10: Les valeurs de l'écart-type (SD) pour le frottement latéral fs et la résistance de pointe qc.....	62
Figure III.. 11: Comparaison des paramètres géotechniques réels et estimés par krigeage (qc, fs) aux point SDG 2.	63
Figure III.. 12: Comparaison des paramètres géotechniques réels et estimés par krigeage (qc, fs) aux point SDG 5.	63

Listes des tableaux

Tableau I. 1 : la classification des sols selon Robertson.....	20
Tableau III. 1: les coordonnées géographiques et l'altitude du CPT.....	43
Tableau III. 2 : les paramètres mesures de sondage N01	44
Tableau III. 3 : les paramètres mesures de sondage N02	44
Tableau III. 4 : les paramètres mesures de sondage N03	45
Tableau III. 5 : les paramètres mesures de sondage N04	45
Tableau III. 6 : les paramètres mesures de sondage N05	45
Tableau III. 7 les paramètres mesures de sondage N06	46
Tableau III. 8 : résultat de rapport de friction de sondage 01	46
Tableau III. 9 : résultat de rapport de friction de sondage 02	47
Tableau III. 10 : résultat de rapport de friction de sondage 03	47
Tableau III. 11 : résultat de rapport de friction de sondage 04	48
Tableau III. 12 : résultat de rapport de friction de sondage 05	48
Tableau III. 13 : résultat de rapport de friction de sondage 06	48
Tableau III. 14 : Classification Robertson de sondage 01.....	49
Tableau III. 15 : Classification Robertson de sondage 02.....	50
Tableau III. 16 : Classification Robertson de sondage 03.....	51
Tableau III. 17 Classification Robertson de sondage 04.....	52
Tableau III. 18 : Classification Robertson de sondage 05.....	53
Tableau III. 19 : Classification Robertson de sondage 06.....	54
Tableau III. 20 : Analyse statistique du frottement latéral et de la résistance de pointe du cône	56
Tableau III. 21 : Variogramme anisotrope pour fs et qc	58

Liste des notations

- q_c : résistance de pointe du cône (kN ou MPa)
- f_s : frottement latéral (kN)
- R_f : rapport de friction (%)
- Profondeur (m) : profondeur de mesure lors du CPT
- X, Y : coordonnées géographiques des sondages CPT
- Élévation (m) : altitude du point de sondage
- $\gamma(h)$: variogramme (semi-variance) à la distance h
- h : distance entre deux points d'échantillonnage
- c_0 : effet de pépite (*nugget*)
- C : contribution structurale (partial sill)
- $C + c_0$: palier (sill)
- a : portée (range), distance où la corrélation devient négligeable
- $C/(C+c_0)$: variance structurale relative (rapport)
- RSS : résidu quadratique de l'ajustement du modèle
- R^2 : coefficient de détermination du modèle de variogramme
- $Z(x_0)$: valeur réelle au point x_0
- $Z^*(x_0)$: valeur krigée (estimation au point x_0)
- λ_i : poids attribué au point de mesure i dans le krigeage
- μ : multiplicateur de Lagrange (contrainte d'optimalité)
- $\sigma^{2k}(x_0)$: variance d'estimation du krigeage
- $\gamma(h_{ij})$: variogramme entre les points i et j

Introduction Générale :

La compréhension du comportement des sols est essentielle en géotechnique et en génie civil, car la stabilité et la durabilité des ouvrages dépendent directement des caractéristiques du sol. En raison de l'hétérogénéité naturelle des sols, des investigations précises sont nécessaires pour déterminer leurs propriétés mécaniques et physiques de manière fiable. Parmi les méthodes utilisées, les essais in situ, et en particulier le test de pénétration statique au cône (CPT), occupent une place primordiale grâce à leur capacité à fournir un profil continu des résistances du sol et à faciliter l'identification des couches géotechniques.

Toutefois, la répartition spatiale limitée des essais sur le terrain constitue une contrainte importante. Pour y remédier, la géostatistique offre une approche performante pour modéliser la variabilité spatiale des paramètres géotechniques, estimer les zones non investiguées et quantifier l'incertitude associée. À travers des outils tels que le variogramme et le krigeage, elle permet d'améliorer l'interprétation des données issues du CPT.

Ce travail a pour objectif d'analyser les propriétés géotechniques des sols à partir des essais CPT et d'appliquer les méthodes géostatistiques pour élaborer une cartographie fiable des paramètres du sol, identifier les zones hétérogènes et aider à une meilleure prise de décision dans les projets de génie civil. Il s'inscrit ainsi dans une approche visant une conception plus sûre, rationnelle et durable des ouvrages.

CHAPITRE I :

*ÉTUDE DES SOLS ET
TECHNIQUES
D'EXPLORATION
PAR LE TEST CPT*

1 Généralités sur les sols :

Le sol est la couche superficielle de la Terre issue de l'altération des roches, jouant un rôle essentiel dans le cycle de la vie et le soutien des activités humaines, notamment l'agriculture. Sa formation, lente et influencée par le climat, la roche mère, la topographie, la végétation et l'homme, détermine ses propriétés physiques, chimiques et biologiques. La diversité climatique engendre une grande variété de sols aux caractéristiques et usages variés. [1.2]

1.1 Certains types de sols :

En géotechnique, les sols se distinguent par leur composition, leur comportement mécanique et leur interaction avec l'eau. Les principaux types rencontrés sont : [1.3]

1.1.1 Sols sableux :

Les sols sableux sont constitués principalement de particules grossières issues de la désagrégation des roches. Ils présentent une faible cohésion, mais un bon drainage grâce à la taille des grains et à la perméabilité élevée. La figure 1 représente un sol sableux.



Figure I. 1: Sols sableux

1) Caractéristiques :

Texture grossière, grande perméabilité, faible capacité de rétention d'eau, pauvres en nutriments.

1.1.2 Sols argileux :

Les sols argileux sont constitués de particules très fines (moins de $2 \mu\text{m}$) issues de l'altération chimique des roches. Leur comportement dépend fortement de la teneur en eau et de la minéralogie de l'argile. La figure 2 représente un sol argileux.



Figure I. 2 : Sols argileux

1) Caractéristiques :

Texture fine, forte capacité de rétention d'eau, riche en minéraux.

1.1.3 Sols limoneux :

Les sols limoneux sont composés de particules fines de taille intermédiaire entre celles du sable et de l'argile (≈ 2 à $50 \mu\text{m}$). Ils sont très sensibles aux conditions climatiques et présentent des propriétés mécaniques variables. La figure 3 représente un Sols limoneux.



Figure I. 3 : Sols limoneux

1) Caractéristiques :
Mélange équilibré de sable, limon et argile ; bonne aération et rétention d'eau.

1.1.4 Sols calcaires :

Les sols calcaires proviennent de la décomposition et de l'altération des roches calcaires (carbonates de calcium). Ils présentent des comportements particuliers liés à leur composition chimique et à leur interaction avec l'eau. La figure 4 représente un Sols calcaires



Figure I. 4 : Sols calcaires

1) Caractéristiques :
Riches en carbonate de calcium, couleur claire, pH alcalin.

2 Les essais in situ :

2.1 Définition et rôle des essais in situ :

Les essais in situ sont des méthodes d'investigation géotechnique réalisées directement sur le terrain, sans extraction d'échantillons pour le laboratoire.

Ils permettent de mesurer certaines propriétés mécaniques des sols et des roches en place, dans leurs conditions naturelles de contrainte et d'humidité.

Ces essais sont particulièrement utiles pour évaluer la portance, la compacité, la cohésion, ou encore la perméabilité du sol. [1.2.5]

2.2 Avantages des essais in situ :

Les essais in situ présentent plusieurs avantages majeurs dans l'étude géotechnique des sols. Ils permettent tout d'abord d'obtenir des données directement dans le sol en place, évitant ainsi toute altération liée à l'extraction d'échantillons.

Ces méthodes offrent également des profils continus de grande résolution, en particulier dans le cas du test de pénétration au cône (CPT), ce qui facilite l'identification précise des variations de couches.

De plus, leur rapidité d'exécution et leur coût relativement raisonnable en font des outils efficaces pour les campagnes d'investigation.

Enfin, ils permettent d'estimer différentes propriétés mécaniques du sol sans nécessiter d'échantillons intacts, ce qui constitue un avantage important dans les sols difficiles à prélever ou sensibles à la déstructuration. [1.5]

2.3 Inconvénients :

Malgré leurs nombreux avantages, les essais in situ présentent également certaines limites. Ils nécessitent souvent des équipements spécialisés, dont le coût peut être élevé, ce qui peut représenter une contrainte pour certaines investigations.

Par ailleurs, plusieurs essais, tels que le SPT ou le pressiomètre, exigent la réalisation préalable d'un forage, augmentant ainsi le temps et le coût de la procédure. Les résultats obtenus sont également sensibles aux conditions d'exécution et à la calibration des appareils, ce qui peut influencer leur fiabilité si les protocoles ne sont pas strictement respectés.

Enfin, pour certaines propriétés spécifiques du sol, comme la teneur en eau ou les limites d'Atterberg, les essais in situ restent moins précis que les analyses réalisées en laboratoire.

3 Principe du test de pénétration statique au cône (CPT) :

Le test de pénétration statique au cône (CPT) est un essai in situ utilisé en géotechnique pour caractériser les sols en profondeur sans extraction d'échantillons.

Il consiste à enfoncer verticalement un cône en acier dans le sol à vitesse constante (généralement 2 cm/s) à l'aide d'un système hydraulique.

Ce test fournit un profil continu et détaillé des propriétés du sol en mesurant la résistance à la pénétration. la figure 6 représente Le test de pénétration au cône (CPT). [5.8]



Figure I. 5 : Le test de pénétration au cône (CPT)

3.1 Description de l'équipement :

L'équipement de CPT comprend les éléments suivants :

Le cône : de forme standardisée (généralement 60° d'angle), il mesure la résistance de pointe (q_c), c'est-à-dire la force nécessaire pour pénétrer dans le sol.

Le manchon de friction : situé juste au-dessus du cône, il permet de mesurer la friction latérale (f_s) exercée par le sol contre la tige.

Des capteurs : électroniques ou électriques, intégrés dans le cône et le manchon, ils transmettent en temps réel les données au système de mesure en surface.

Le système d'enfoncement : généralement hydraulique, il assure une pénétration régulière et contrôlée du cône à travers le sol.

Tige de poussée et système d'acquisition : les tiges relient le cône au dispositif en surface, tandis que l'unité d'acquisition enregistre les données à chaque profondeur.

3.2 Paramètres mesurés :

Le test CPT permet de mesurer plusieurs paramètres en continu :

q_c – Résistance de pointe : force nécessaire pour enfoncer le cône dans le sol (MPa ou kPa).

f_s – Friction latérale : force de frottement sur le manchon cylindrique. [8]

3.3 Le rapport de friction :

Le rapport de friction, noté R_f , est un paramètre dérivé du test de pénétration statique au cône (CPT) permettant d'aider à la classification des sols.

Il représente le pourcentage de la friction latérale (f_s) exercée sur le manchon par rapport à la résistance de pointe (q_c) mesurée au niveau du cône. Il est calculé par la relation :

$$R_f = (f_s / q_c) \times 100 \text{(I.1)}$$

3.4 La classification des sols selon Robertson :

La classification des sols selon Robertson est un système d'interprétation géotechnique basé sur les résultats du test de pénétration statique au cône (CPT ou CPTu).

Elle permet d'identifier le type de sol rencontré en analysant la résistance de pointe (q_c), la friction latérale (f_s) et, le cas échéant, la pression interstitielle (u).

À partir de ces paramètres, Robertson a établi des zones caractéristiques qui correspondent chacune à une catégorie de sol, allant des sables propres aux argiles plastiques, en passant par les limons et les sols organiques.

Cette classification, largement utilisée en ingénierie géotechnique, offre une méthode rapide, fiable et continue pour déterminer la nature du sol en profondeur et orienter les choix de conception des fondations et des ouvrages. [8.9]

Voici la classification des sols selon Robertson :

Zone	Type de sol approximatif	R_f (%)	q_c (MPa) indicatif
1	Sable très propre	< 0.5–1	Élevé
2	Sable propre à faible cohésion	0.5 – 1.5	Élevé
3	Sable fin à limoneux	1.5 – 3	Moyen
4	Limon limoneux à argileux	3 – 6	Moyen
5	Limon argileux / Argile faible cohésion	6 – 12	Moyen à faible
6	Argile sensible / molle	> 12	Faible
7	Argile plastique (normale à sur consolidée)	> 4–8	Variable
8	Sol organique / tourbe	> 10–100	Très faible
9	Couche dure / roche altérée	< 0	Très élevé

Tableau I. 1 : la classification des sols selon Robertson.

4 Procédure de réalisation du test de pénétration statique au cône (CPT) :

4.1 Normes applicables :

L'essai de pénétration statique au cône est encadré par des normes internationales, garantissant la qualité et la comparabilité des résultats. La norme de référence principale est :

- NF EN ISO 22476-1 – Reconnaissance et essais géotechniques – Essais in situ – Essai de pénétration statique au cône :

La norme principale pour le CPT précise les exigences sur l'équipement, la procédure de terrain, la mesure des paramètres (résistance de pointe, friction latérale, pression interstitielle) et l'enregistrement/interprétation des données, assurant ainsi des résultats fiables et comparables.

- ASTM D5778 – Méthode d'essai normalisée pour les tests de pénétration électronique au cône et au piézocône des sols :

La norme américaine pour le CPT et le CPTu (avec mesure de la pression interstitielle) précise les méthodes d'étalonnage et définit les procédures nécessaires pour garantir la précision et la fiabilité des mesures électroniques.

- ISO 17892-12 – Investigation et essais géotechniques – Essais en laboratoire des sols – Essais sur le terrain : Test de pénétration au cône :

Cette norme complète l'ISO 22476-1 en précisant les méthodes d'exécution, de mesure et d'interprétation des tests de pénétration au cône, garantissant des résultats fiables et comparables. [10.11.12]

4.2 Conditions d'exécution sur le terrain :

Pour garantir la qualité des données, plusieurs conditions doivent être respectées lors de l'exécution :

Sol non obstrué : le sol doit être exempt de blocs rocheux, débris ou structures enterrées.

Bonne stabilité de la machine : la machine d'enfoncement doit reposer de manière stable pour assurer une pénétration verticale uniforme.

Correction de la pression interstitielle (si CPTU) : une saturation correcte du filtre poreux autour du piézomètre est essentielle pour obtenir des mesures fiables.

Conditions climatiques : éviter l'exécution pendant des pluies intenses ou sur sol gelé sans précautions particulières.[10]

5 Conclusion :

L'étude des sols est essentielle en géotechnique pour comprendre leur comportement et leur interaction avec les ouvrages.

Les essais in situ, notamment le test de pénétration statique au cône (CPT), fournissent des profils continus de résistance et permettent d'identifier précisément les différentes couches de sol.

Le CPT est un outil précieux pour le dimensionnement des fondations, l'évaluation des risques géotechniques et la prise de décision en phase de projet. La combinaison de la théorie, des essais et d'une interprétation rigoureuse réduit les incertitudes et garantit la sécurité, la durabilité et la performance des structures.

CHAPITRE II :

LA GÉOSTATISTIQUE

1 Introduction :

La géostatistique, développée par Georges Mathéron dans les années 1960 pour l'industrie minière, est une branche des statistiques dédiée à l'étude des phénomènes spatialisés.

Elle combine hasard et continuité spatiale en intégrant la corrélation entre points de mesure, ce qui permet d'obtenir des estimations fiables et d'évaluer l'incertitude.

Dans ce travail, elle est utilisée pour analyser et modéliser les données via le variogramme et des méthodes d'interpolation comme le krigeage.

L'objectif est de présenter ses concepts fondamentaux, ses méthodes et leur application aux données étudiées.[13]

2 Définition de la géostatistique :

La géostatistique est une branche des statistiques appliquées qui étudie et modélise les phénomènes spatiaux ou spatio-temporels.

Elle permet d'analyser, d'estimer et de prédire des variables mesurées à différents points d'un espace géographique en tenant compte de la structure de dépendance spatiale entre ces points.

Elle repose sur des concepts tels que la variable régionalisée, le variogramme et le krigeage, offrant à la fois des estimations des valeurs et des mesures de l'incertitude associée, ce qui la distingue des méthodes d'interpolation classiques.[13]

3 Historique et fondements de la géostatistique :

La géostatistique est apparue dans les années 1960 grâce à Georges Mathéron, qui introduisit la notion de variable régionalisée et développa les outils mathématiques pour analyser les phénomènes spatiaux.

Initialement conçue pour l'industrie minière, elle s'est progressivement étendue à de nombreux domaines tels que la pétrologie, l'hydrogéologie, l'agriculture, l'environnement et le génie civil. Son principal intérêt réside dans sa capacité à modéliser des phénomènes spatiaux complexes en intégrant les corrélations entre les données.

Le fondement de la géostatistique repose sur l'idée que les phénomènes naturels possèdent à la fois une composante aléatoire, reflétant l'incertitude et la variabilité naturelle, et une structure spatiale, traduisant le fait que deux points voisins tendent à être plus semblables que deux points éloignés.

Le variogramme constitue l'outil central de la géostatistique, car il décrit la dépendance spatiale entre les données et permet de construire des modèles adaptés. Grâce à lui, des méthodes comme le krigeage offrent non seulement une estimation précise mais aussi une mesure de l'incertitude.

Contrairement aux techniques d'interpolation classiques, la géostatistique adopte une approche probabiliste, robuste même lorsque les données sont limitées ou irrégulièrement distribuées.[15.16]

4 Domaines d'application de la géostatistique :

La géostatistique est une discipline particulièrement utile dans les domaines où les phénomènes présentent une variabilité spatiale et où il est nécessaire de prédire ou d'estimer des valeurs en des points non échantillonnés. Ses applications couvrent plusieurs secteurs :

1. Industrie minière et métallurgique :
 - Estimation des réserves minérales et métalliques à partir d'échantillons ponctuels.
 - Modélisation tridimensionnelle des gisements pour optimiser l'exploitation minière.
 - Évaluation de la variabilité spatiale des teneurs en minerais et planification des extractions selon la qualité.
2. Hydrogéologie et gestion de l'eau :
 - Modélisation et cartographie des nappes phréatiques.
 - Estimation de la perméabilité et de la transmissivité des sols et des roches.
 - Prévision des niveaux d'eau et gestion durable des ressources hydriques.
3. Agriculture et pédologie :
 - Cartographie de la fertilité des sols, de la teneur en éléments nutritifs et de la texture des sols.
 - Gestion de la variabilité des rendements à l'échelle des parcelles agricoles.
 - Optimisation de l'irrigation et des apports d'engrais en fonction de la variabilité spatiale du sol.
4. Environnement :
 - Suivi et modélisation de la pollution des sols, des eaux et de l'air.
 - Cartographie des zones à risque environnemental ou de contamination chimique.
 - Évaluation des impacts environnementaux et aide à la prise de décision pour la réhabilitation des sites contaminés.
5. Génie civil et géotechnique :
 - Caractérisation des sols et des matériaux de fondation.
 - Estimation des propriétés mécaniques des sols (résistance, cohésion, perméabilité).
 - Planification et conception des ouvrages de construction (routes, bâtiments, barrages).
6. Géologie et pétrologie :
 - Analyse de la répartition spatiale des types de roches et des formations géologiques.
 - Cartographie et prédiction de la variabilité des sédiments, minéraux et hydrocarbures.
7. Climatologie et météorologie :
 - Interpolation spatiale de données climatiques comme la température, les précipitations ou la vitesse du vent.

- Prévision météorologique locale ou régionale à partir d'un réseau de stations échantillonnées.
8. Santé publique et épidémiologie :
- Analyse spatiale de la répartition des maladies ou des contaminations.
 - Identification des zones à risque et aide à la planification des interventions sanitaires.

5 Concepts fondamentaux de la géostatistique :

La géostatistique repose sur plusieurs concepts essentiels permettant de modéliser et de quantifier la variabilité spatiale des phénomènes naturels. Ces notions constituent la base des méthodes d'analyse et d'estimation utilisées dans ce domaine.

5.1 Variable régionalisée :

Une variable régionalisée est une grandeur mesurable qui varie dans l'espace et dont les valeurs présentent à la fois un caractère aléatoire et une structure spatiale.

Par exemple, la teneur en métal dans un gisement, la perméabilité d'un sol ou la teneur en eau d'un aquifère sont des variables régionalisées.

Mathématiquement, une variable régionalisée $Z(x)$ est considérée comme une réalisation d'un processus aléatoire défini sur un domaine spatial $x \in D \subset \mathbb{R}^n$

5.2 Stationnarité :

La stationnarité désigne les conditions statistiques supposées sur la variable régionalisée :

- Stationnarité d'ordre 1 : l'espérance mathématique est constante dans tout le domaine d'étude :

$$E[Z(x)] = m \forall x \quad (\text{II.1})$$

- Stationnarité d'ordre 2 : la covariance entre deux points dépend uniquement du vecteur de séparation h , et non de leur position absolue :

$$C(h) = \text{Cov}(Z(x), Z(x+h)) \quad (\text{II.2})$$

Ces hypothèses permettent de simplifier l'analyse et de modéliser la dépendance spatiale.[20]

5.3 Covariance spatiale :

La fonction de covariance exprime le degré de ressemblance entre les valeurs de la variable régionalisée séparées par une distance h :

$$C(h) = E[(Z(x) - m)(Z(x+h) - m)] \quad (\text{II.3})$$

Une forte covariance indique une corrélation élevée entre les points proches, tandis qu'une covariance faible traduit une variabilité plus importante. [20]

5.4 Variogramme :

Le variogramme est l'outil central de la géostatistique. Il mesure la dissimilarité entre deux points en fonction de la distance qui les sépare. :[18]

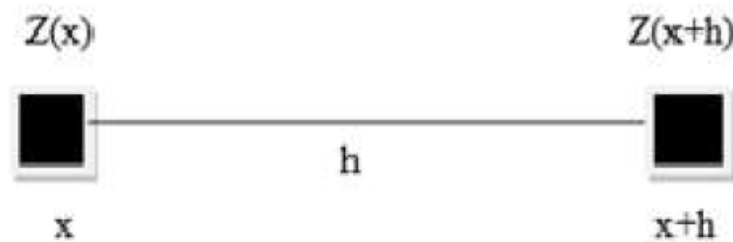


Figure II. 1 : Représentation schématique des points de mesure de la variable.

5.4.1 variogramme expérimental :

Dans la pratique, il n'est pas possible de calculer le variogramme théorique tel qu'il est décrit, car on ne dispose que des échantillons. Pour l'approcher, une expression du variogramme expérimental est plus pratique.

Le variogramme permet de mesurer la variabilité à différentes échelles d'une variable régionalisée $z(x)$, en calculant la différence entre deux échantillons z_1 et z_2 situés en deux points x_1 et x_2 d'un domaine spatial. Cette différence notée γ s'écrit :

$$\gamma = (Z_2 - Z_1)/2 \quad (\text{II.4})$$

Pour voir si l'azimut décrit par les deux points considérés γ de la distance et de l'orientation de la paire de points.

$$\gamma = \frac{1}{2} (Z(X) - Z(X + h))^2 \quad (\text{II.5})$$

En formant la moyenne des dissemblances γ entre les valeurs pour toutes les $N(h)$ paires de points reliés par un vecteur h donné pour une maille donnée, on obtient la notion de variogramme expérimental.

$$\gamma_e(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad (\text{II.6})$$

Où :

- $N(h)$ = nombre de paires de points séparés par h .

- $Z(x_i)$ = valeur observée en x_i .

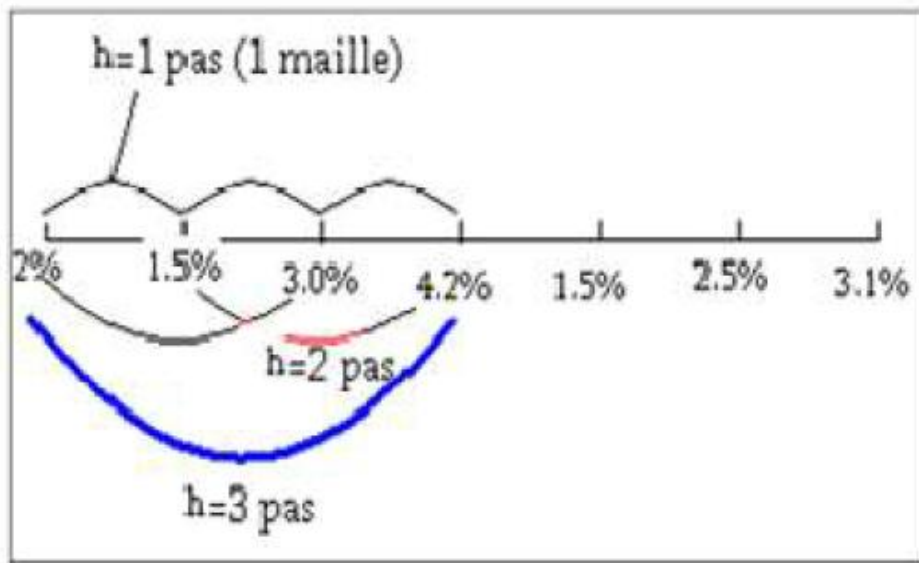


Figure II. 2: Schéma de calcul du variogramme expérimental.[23]

On peut aussi calculer le variogramme selon certaines directions spécifiques à l'aide d'une expression particulière du variogramme :

$$\gamma_e(h, \theta) = \frac{1}{2N(h, \theta)} \sum_{i=1}^{N(h, \theta)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad (\text{II.7})$$

Où :

$N(h, \theta)$: est le nombre de paires de points séparés d'une distance h dans la direction θ .

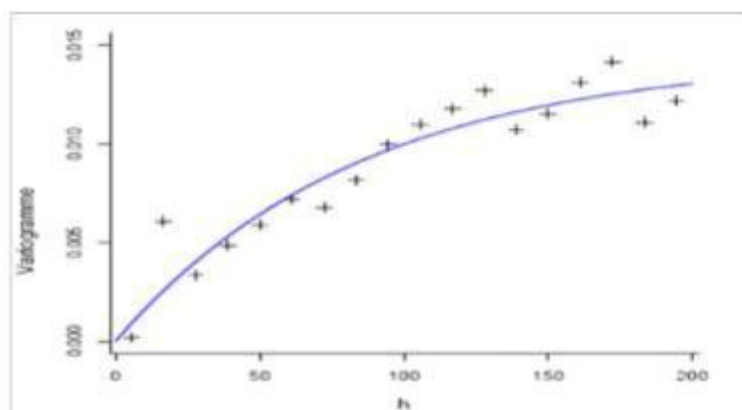


Figure II. 3: Ajustement d'un modèle théorique (courbe) à un modèle expérimental (croix).[23]

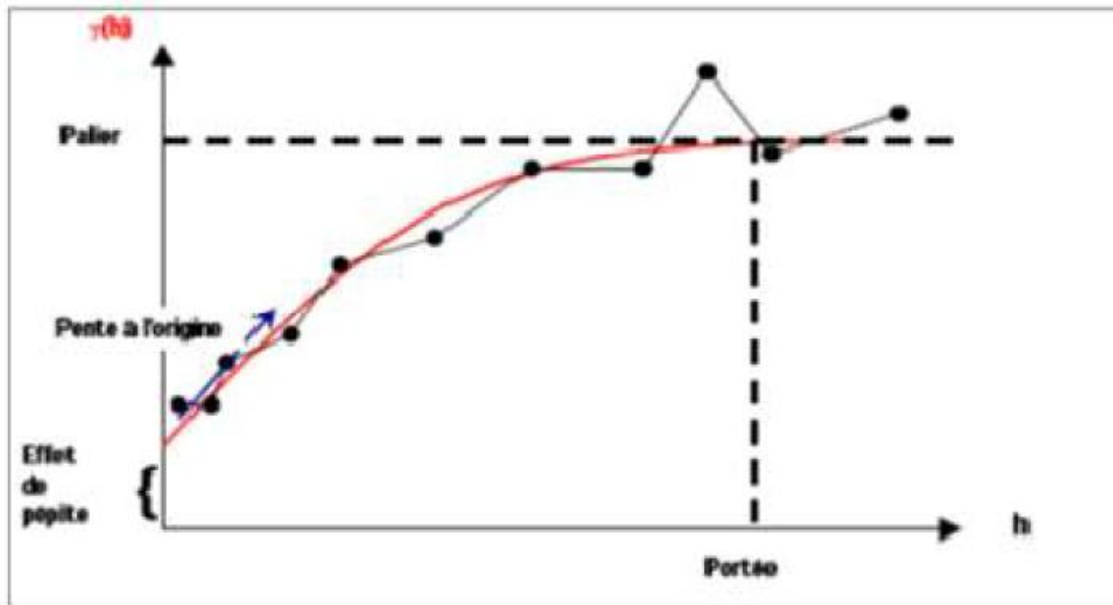


Figure II. 4: Graphe d'un variogramme expérimental et son modèle d'ajustement.[23]

5.4.2 variogramme théorique :

Soit Z variable considérée distribuée dans un domaine 1D (dimension), 2D ou 3D.

La formulation théorique du variogramme $\gamma_{th}(h)$ fait appel à la notion de variance (Var) appliquée à la différence entre deux observations $Z(x)$ et $Z(x+h)$ séparées par une distance h .

Ce qui donne le variogramme théorique, pour tout x dans G :

$$\gamma_{th} = \frac{1}{2} \text{Var} [(Z(X) - Z(X + h))](II.8)$$

On peut schématiser l'ensemble des modèles théoriques de variogramme par le graphique de la (Figure II. 5). Ce graphique met en avant trois paramètres fondamentaux : l'effet de pépite, le seuil, et la portée. Ces trois paramètres sont brièvement décrits ci-dessous.

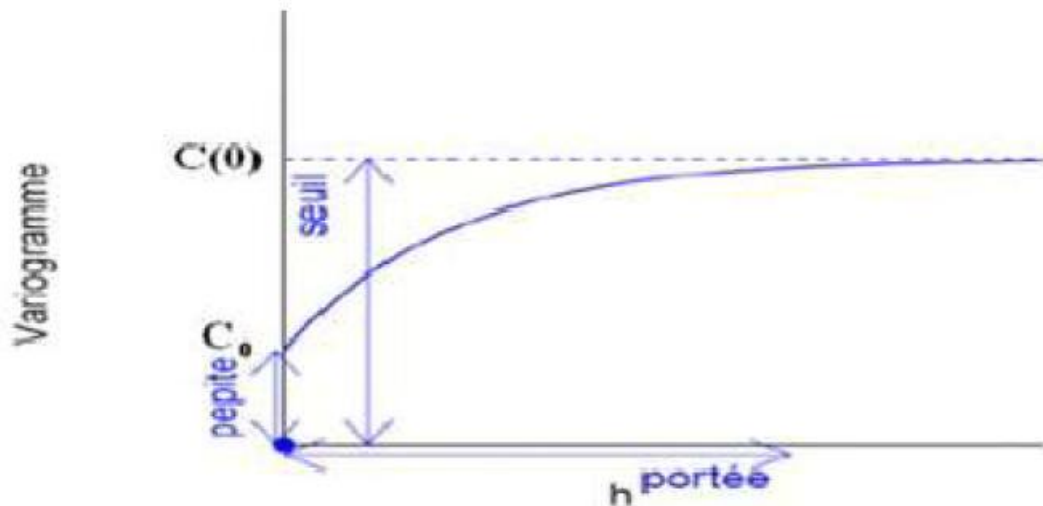


Figure II.5 : Schéma type d'un variogramme.[23]

5.4.3 L'Effet de pépite :

L'effet de pépite C_0 est défini par la valeur de variogramme au voisinage de l'origine. C'est la limite de cette fonction quand h tend vers 0.

Il représente une discontinuité à l'origine qui est expliquée par d'éventuelles erreurs de mesure ou par la présence d'une microstructure d'une portée plus faible que la maille d'échantillonnage utilisée.

5.4.4 La portée :

Dans l'étude de la variabilité spatiale, il est important d'examiner le comportement du variogramme à grande distance. La fonction variogramme peut atteindre une limite à partir d'une certaine distance appelée portée (a). A partir de cette distance il n'y a plus de corrélation spatiale entre les données.

Cette limite est nommée palier et désigne la variance totale $C(0)$. Dans la pratique, la portée est définie par la distance à laquelle le variogramme atteint 95% de la valeur de son palier.

5.4.4.1 Le seuil ou palier :

On appelle seuil du variogramme sa valeur limite pour de grandes valeurs de h . Ce paramètre suscite un intérêt très important dans l'analyse de la régularité des variations locales.

En effet, si le seuil d'un variogramme est infini, alors le processus des variations locales n'est pas stationnaire.

5.5 Modèles de variogramme :

Une fois que le variogramme expérimental a été construit, on passe à l'adaptation d'un modèle théorique de variogramme aux points obtenus en optimisant le modèle par contre vérification.

Le variogramme théorique est recherché par modélisations en utilisant une fonction connue de la nuée variographique.

L'objectif est de trouver la courbe théorique qui s'adapte le mieux à la courbe expérimentale.

Les principaux modèles admissibles sont l'effet de pépité, le modèle linéaire, le modèle sphérique, le modèle puissance, le modèle gaussien et le modèle exponentiel.

Une combinaison de deux de ces modèles ou plus est également faisable.

5.5.1 L'effet de pépité :

La situation de plus forte irrégularité des variations locales correspond à une absence de dépendances entre des mesures effectuées en des sites différents, ce qui se traduit par l'effet de pépité :

Pour tout $h \neq 0$; $C(h) = 0$, $\gamma(h) = C(0)$.

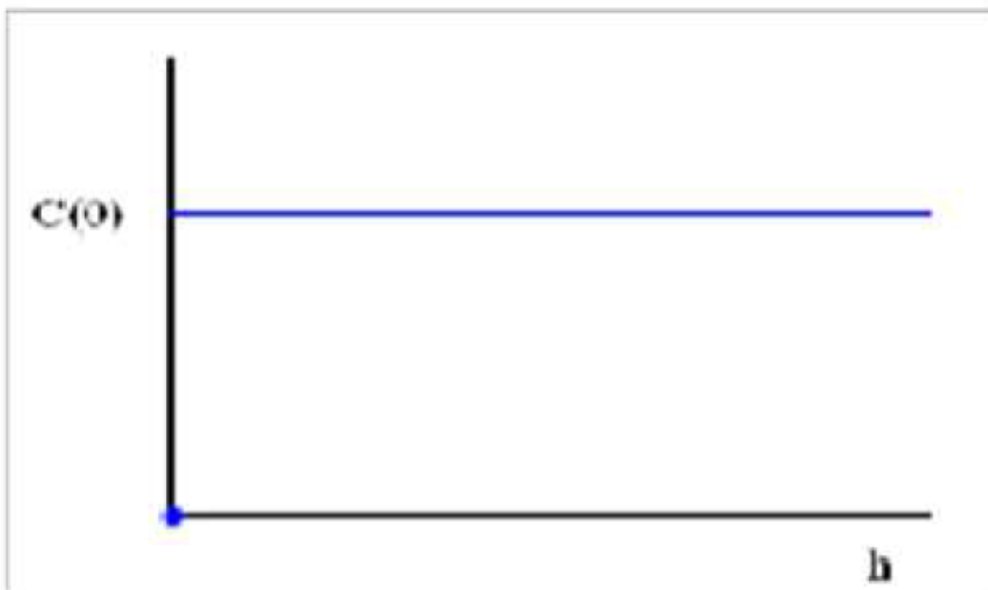


Figure II. 6 : variogramme forte irrégularité (pépité pure).[23]

Pour l'interpolation, le variogramme expérimental est ajusté à l'aide de modèles théoriques, parmi les plus courants :

5.5.2 Modèle sphérique :

L'expression générale du modèle sphérique (le plus utilisé) s'écrit :

$$\gamma(h) = C_0 + C \left[\frac{3h}{2a} - \frac{1}{2} \left(\frac{h}{a} \right)^3 \right] \text{ Si } h \leq a \quad (\text{II.9})$$

$$\gamma(h) = C_0 + C \text{ Si } h > a \quad (\text{II.10})$$

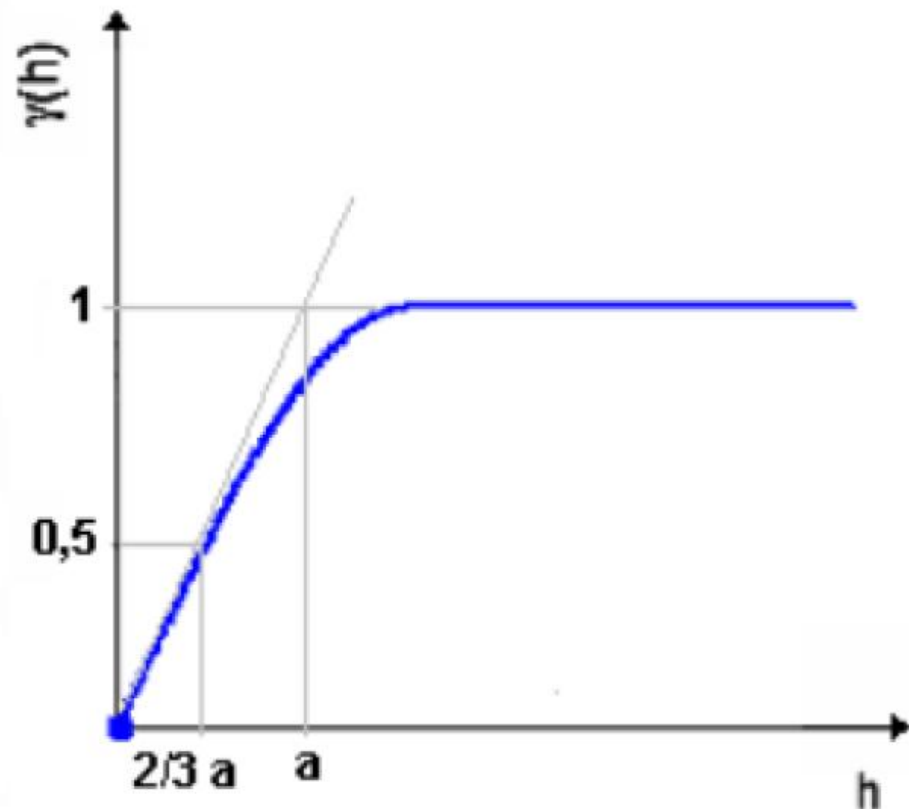


Figure II. 7 : Type d'un modèle de variogramme sphérique.[23]

5.5.3 Modèle exponentiel :

L'expression générale du modèle exponentiel s'écrit :

$$\gamma(h) = \gamma_0 + \sigma^2 [1 - \exp(-h/a)] \quad (\text{II.11})$$

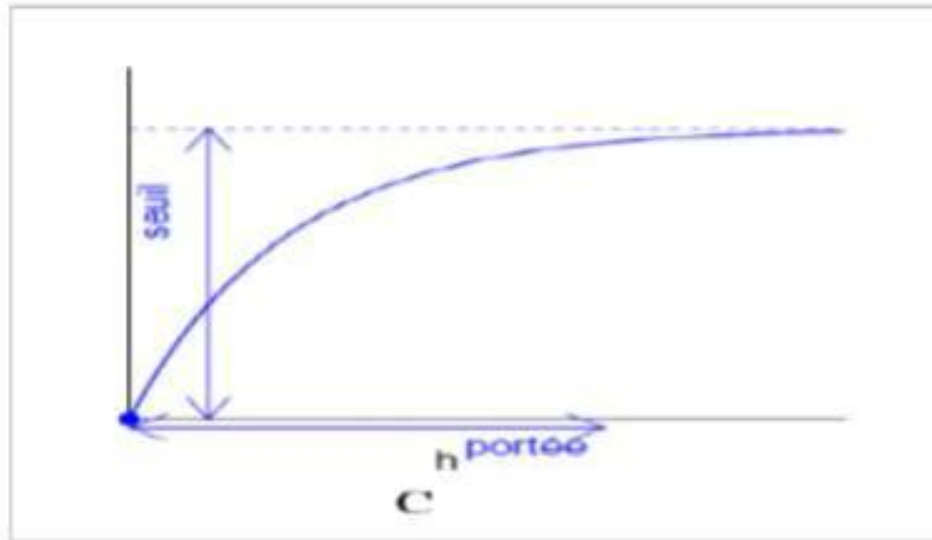


Figure II. 8 : Type d'un modèle de variogramme exponentiel.[23]

5.5.4 Modèle gaussien :

L'expression générale du modèle Gaussien s'écrit :

$$\gamma(h) = \gamma_0 + \sigma^2[1 - \exp(-h^2/a^2)] \quad (\text{II.12})$$

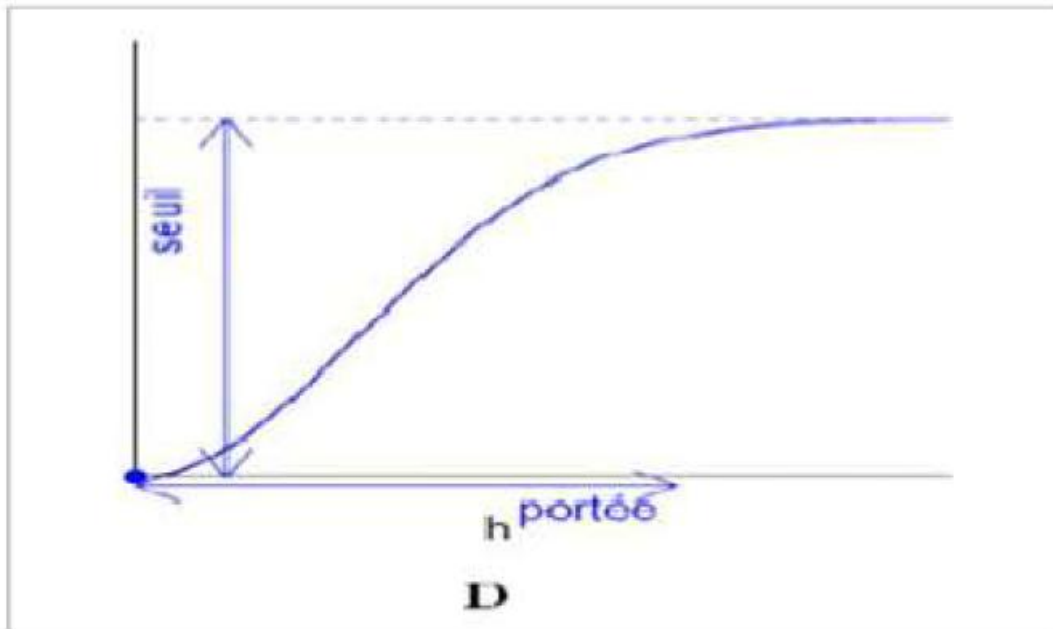


Figure II. 9 : Type d'un modèle de variogramme Gaussien.[23]

5.6 Le krigeage :

Le krigeage est une procédure géostatistique avancée qui génère une surface estimée à partir d'un ensemble dispersé de points avec des valeurs z.

Contrairement à d'autres méthodes du jeu d'outils d'interpolation, utiliser l'outil Krigeage efficacement implique d'analyser de manière interactive le comportement spatial du phénomène représenté par les valeurs z avant de sélectionner la meilleure méthode d'estimation pour la génération de la surface en sortie.

Le krigeage repose fondamentalement sur la modélisation et l'estimation de la structure de dépendance spatiale.

La description de cette dernière se fait couramment à l'aide d'outils statistiques tels que le variogramme ou la covariance, calculés sur l'ensemble du domaine d'intérêt et sous une hypothèse de stationnarité.

Seule la méthode d'interpolation par krigeage repose sur une méthode statistique satisfaisante et permet d'obtenir la vraie variance d'estimation. Puisqu'on peut calculer la variance d'estimation pour tout estimateur linéaire, pourquoi ne pas choisir celui qui assure la variance d'estimation minimale ? C'est précisément ce qu'effectue le krigeage.

Dans le cas stationnaire, on en reconnaît 2 types principaux, selon que la moyenne du processus est connue ou non, soit le krigeage simple et le krigeage ordinaire. Ce dernier est, de loin, le plus fréquemment utilisé.[19.20]

5.6.1 Types de krigeage :

5.6.1.1 Krigeage ordinaire :

Le krigeage ordinaire est une opération qui est répétée en chaque nœud x_0 d'une grille régulière recouvrant le domaine étudié. Pour un ensemble de n points de données x d'un voisinage centré autour d'un point x_0 de la maille d'estimation, on peut construire, en minimisant la variance d'estimation.

Ce système permet donc de retrouver les N pondérateurs λ_i . Ces derniers, dit pondérateurs de krigeage, donnent la variance d'estimation le plus petit possible et elle est appelée variance de Krigeage. Où les λ_i sont des pondérateurs à affecter aux points de données et où μ est un paramètre de Lagrange qui intervient pour des raisons algébriques.

Le membre gauche du système contient les covariances entre les points de données, tandis que le membre droit contient les covariances entre chaque point de donnée et le point d'estimation x_0 .

Ce système, une fois résolu, permet de transférer au point x_0 de l'information en provenance des points de données voisins, par le calcul d'une moyenne pondérée. En effectuant la multiplication matricielle, on peut réécrire le système sous la forme :

$$\begin{cases} \sum_{i=1, n} \lambda_i \gamma(x_i, x_j) + \mu = \gamma(x_j, x_0) & (i, j = 1, 2, \dots, n) \\ \sum_{i=1}^N \lambda_i = 1 \end{cases} \quad (\text{II.13})$$

Sous forme matricielle :

$$\begin{pmatrix} \gamma_{11} & \gamma(x_1, x_2) & \dots & \gamma(x_1, x_n) & 1 \\ \gamma(x_2, x_1) & \gamma_{22} & \dots & \gamma(x_2, x_n) & 1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \gamma(x_n, x_1) & \gamma(x_n, x_2) & \dots & \gamma_{nn} & 1 \\ 1 & 1 & \dots & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \vdots \\ \lambda_n \\ \mu \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \gamma(x_1, x_0) \\ \gamma(x_2, x_0) \\ \vdots \\ \gamma(x_n, x_0) \\ 1 \end{pmatrix} \quad (\text{II.14})$$

$$Z^*(x_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i Z_i(x) \quad (\text{II.15})$$

L'estimé est obtenu par :

$$\sigma_e^2 = \sum_{i=1, n} \lambda_j \gamma(x_i, x) - \bar{\gamma}(x, x) + \mu \quad (\text{II.16})$$

5.6.1.2 Krigeage simple :

Du champ à estimer ou du moins on en possède un estimé parfois on connaît la moyenne fiable. On peut alors former un estimateur sans biais :

$$Z^* = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) + (1 - \sum_{i=1}^n \lambda_i) \mu \quad (\text{II.17})$$

La variance d'estimation en krigeage simple est :

$$\sigma^2 = \sum_{i=1}^n \lambda_i \gamma(x_i - x_0) + \mu \quad (\text{II.18})$$

Comme :

$$\gamma(h) = C(0) - C(h) \quad (\text{II.19})$$

Où :

$\gamma(h)$: variogramme pour la distance h ,

μ : multiplicateur de Lagrange imposant les contraintes du krigeage simple.

5.6.1.3 Propriétés du krigeage :

Les principales propriétés du krigeage peuvent être résumées comme suit :

Méthode linéaire, sans biais et à variance minimale : le krigeage est construit de manière à fournir l'estimation la plus précise possible parmi toutes les combinaisons linéaires non biaisées.

Interpolateur exact : lorsqu'un point de mesure est estimé, la valeur fournie par le krigeage correspond exactement à la valeur observée.

Effet d'écran : les points les plus proches du point à estimer influencent davantage l'estimation, car ils reçoivent les poids les plus élevés. Cet effet dépend à la fois de la configuration spatiale des données et du modèle de variogramme. Plus l'effet de pépite est important, plus cet effet d'écran diminue.

Prise en compte de la géométrie d'échantillonnage : le krigeage intègre la taille du domaine étudié ainsi que la position relative des points entre eux, ce qui en fait une méthode sensible à la distribution spatiale des données.

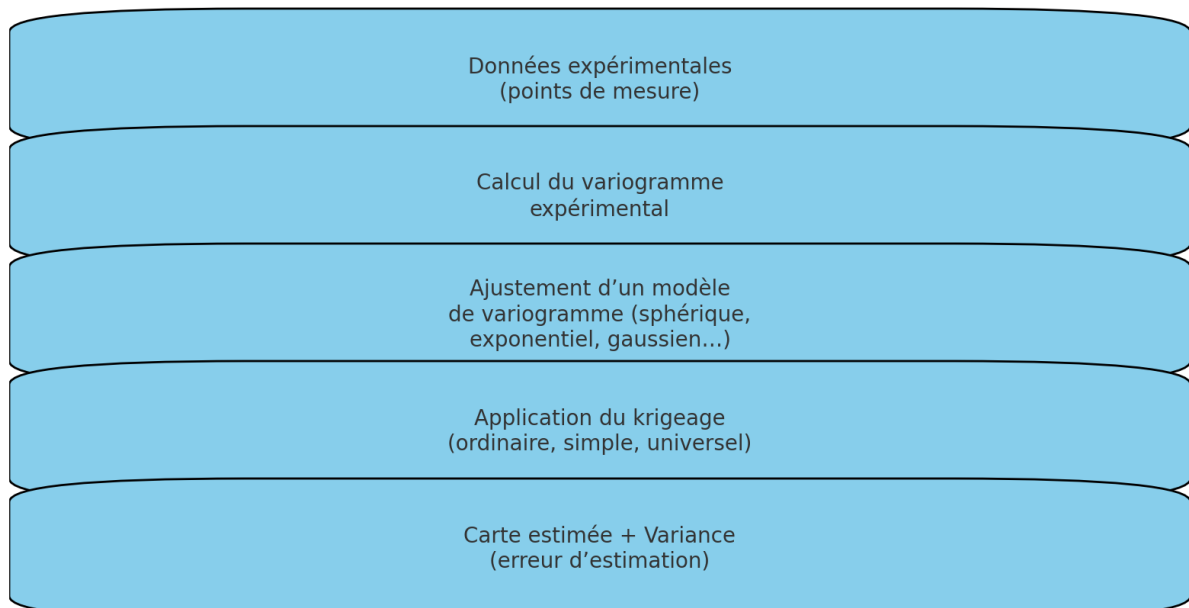
Utilisation explicite du variogramme : grâce au variogramme, le krigeage modélise la continuité spatiale du phénomène, en tenant compte notamment de l'effet de pépite et d'une éventuelle anisotropie.

Effet de lissage : les estimations obtenues par krigeage sont généralement moins variables que les valeurs réelles mesurées ; cette propriété est liée à la minimisation de la variance d'estimation.

Propriété de transitivité : si une valeur observée correspond exactement à la valeur krigée en un point, l'ajout de cette donnée dans l'ensemble d'échantillons n'affecte pas les estimations déjà calculées aux autres points.

En revanche, les variances d'estimation diminuent. De même, lorsque des valeurs krigées sont utilisées comme pseudo-données, elles ne modifient pas les estimations ultérieures, mais réduisent l'incertitude associée.

Schéma explicatif : Variogramme et Krigeage



6 Logiciel GS+ :

GS+ est un logiciel géostatistique utilisée en géotechnique pour analyser la variabilité spatiale des sols. Grâce à l'étude des variogrammes et à l'interpolation par krigeage, il permet d'estimer les propriétés géotechniques dans les zones sans sondages et d'améliorer la compréhension de l'hétérogénéité du sol.

Cet outil contribue ainsi à une meilleure fiabilité des modèles de sous-sol et à une réduction des incertitudes dans les projets géotechniques.[21]

6.1 Analyse de variabilité spatiale :

En géotechnique, les sols présentent souvent une forte hétérogénéité. GS+ permet :

- D'analyser la corrélation spatiale des paramètres du sol.
- De déterminer la portée, l'effet de pépite, et le palier.
- D'identifier les anisotropies verticales ou horizontales en fonction du mode de dépôt.

Paramètres fréquemment étudiés :

- Résistance de pointe du cône (q_c).
- Frottement latéral (f_s).
- Résistance au SPT (N).
- Propriétés hydrauliques (perméabilité).
- Caractéristiques mécaniques (cohésion, angle de frottement).

6.2 Ajustement de modèles de variogrammes :

GS+ propose plusieurs modèles standards :

- Sphérique
- Exponentiel
- Gaussien
- Linéaire avec seuil

L'ingénieur géotechnicien sélectionne le modèle qui :

- Fournit le meilleur ajustement au variogramme expérimental.
- Présente un bon coefficient R^2 .
- Minimise la RSS (résidu quadratique).

Ces informations sont indispensables pour une interpolation fiable.

6.3 Krigeage pour l'interpolation spatiale :

Le logiciel permet d'appliquer différentes méthodes de krigeage, dont le krigeage ordinaire, utilisé pour :

- Prédire des valeurs de q_c , f_s ou N à des endroits sans sondages.
- Générer des cartes de contours des propriétés du sol.
- Évaluer les zones avec forte ou faible incertitude.
- Créer des profils géotechniques continus.

Cela aide à mieux visualiser la géométrie du sol et ses variations verticales et horizontales.

6.4 Évaluation de l'incertitude :

GS+ génère également des cartes d'écart-type (SD) ou d'erreur de krigeage, permettant :

- D'identifier les zones où les prédictions sont fiables.
- De localiser les zones où les sondages sont insuffisants.
- D'aider à la décision pour placer de nouveaux points de sondage.

6.5 Applications pratiques en géotechnique :

- Cartographie de la résistance du sol avant fondations.
- Analyse de stabilité de pente.
- Modélisation du sous-sol pour tunnels ou routes.
- Optimisation de la campagne de sondages.
- Évaluation du risque géotechnique.

GS+ aide à transformer des données ponctuelles en une vision spatiale continue indispensable pour la conception.

7 CONCLUSION :

Dans ce chapitre, nous avons présenté les bases de la géostatistique, une discipline qui analyse les phénomènes présentant une variabilité spatiale à partir de données géoréférencées (X, Y, Z).

Elle repose principalement sur deux outils : le variogramme, qui décrit la dépendance spatiale des données, et le krigeage, une méthode d'estimation optimale permettant d'interpoler les valeurs manquantes tout en quantifiant l'incertitude associée.

La géostatistique offre ainsi une représentation fiable et structurée de la variabilité spatiale, supérieure aux méthodes d'interpolation classiques.

Ce chapitre pose donc les fondations nécessaires pour les analyses géostatistiques développées par la suite.

CHAPITRE III:

ETUDE DE

CAS (SITE DE

MOSTAGANEM)

1 INTRODUCTION :

Ce chapitre vise à présenter de manière approfondie le site d'étude de Mostaganem. Il s'articule d'abord autour de l'analyse des caractéristiques géotechniques du terrain.

Ensuite, les résultats des différentes investigations menées sont détaillés, incluant les sondages carottés, les essais mécaniques in situ (statiques et dynamiques), ainsi que les essais de laboratoire.

2 PRESENTATION DE SITE :

Le site à l'étude est situé à l'est de la ville de Mostaganem au niveau de la plage de Sonachter à côté de l'usine de dessalement d'eau de mer.

Le site réservé au projet est relativement plat avec quelques dunes de sable.[20]

3 LOCALISATION :

Le terrain réservé au projet se trouve à l'Est de la ville de Mostaganem au niveau de la plage Sonachter, Comme illustré sur la figure 08 ci-dessous, le site présente une topographie globalement plate, avec la présence de quelques dunes sableuses visibles sur la figure III. 1..[20]



Figure III.. 1 : localisation de projet par l'application (google earth) [22]



Figure III.. 2 : Dunes de sable de mer

4 CONTEX SISMIQUE :

La région de Mostaganem se situe dans une zone de sismicité modérée, classée en Zone II selon le règlement parasismique algérien actuellement en vigueur (RPA 99 version 2003).

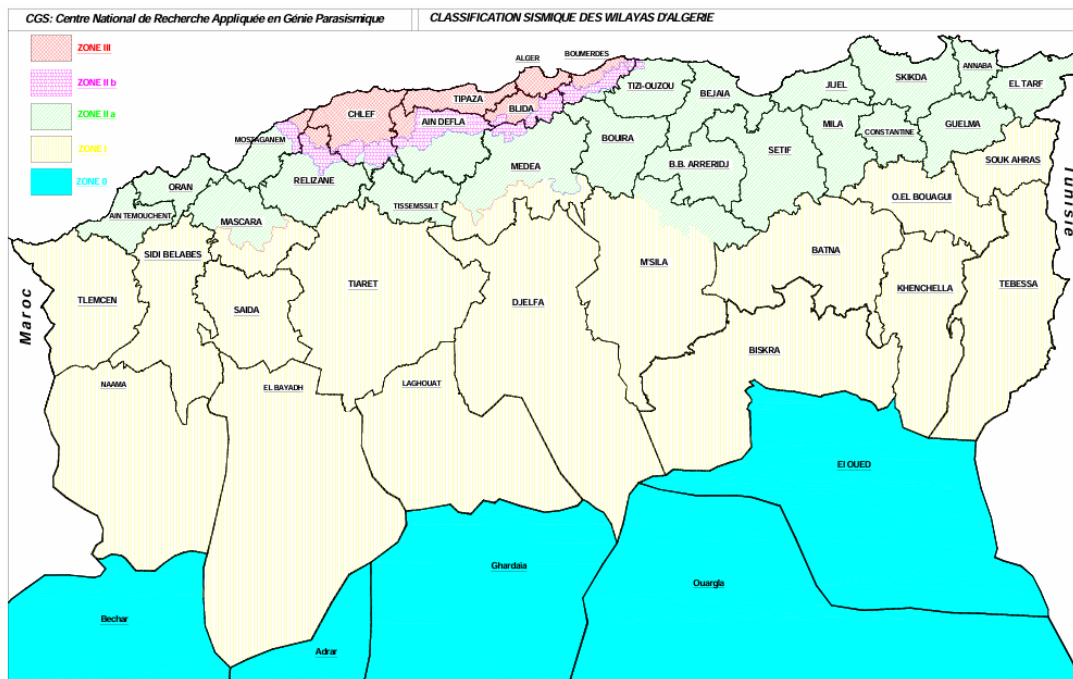


Figure III.. 3: Carte de zonage sismique du territoire national-RPA99 version 2003.[25]

5. CONTEXTE GÉOLOGIQUE :

5.1. GÉOLOGIE RÉGIONALE :

Situé en bordure de la mer Méditerranée, le plateau de Mostaganem se présente comme une vaste aire tabulaire délimitée par la vallée du Chélif au nord, la dépression de la Macta au sud, et à l'est par la vallée de la Mina et les monts de Bel Hacel.

Ce plateau s'incline progressivement vers l'ouest, en direction de la plaine de l'Habra et du golfe d'Arzew.

Il est marqué par une succession de rides et de dépressions parallèles orientées sud-ouest/nord-est, dont l'altitude avoisine 200 m avant de diminuer progressivement jusqu'à environ 100 m au niveau de la Macta.

Au nord, il domine la basse vallée du Chélif à travers une série de falaises hautes de 150 à 200 m. Vers le nord-est, il s'appuie sur l'éperon crétacé du Djebel Diss (Dahra), culminant à 400 m. Enfin, au sud-est, il est bordé par une ligne de relief formée par les hauteurs de l'Akboube et d'Ennaro, séparant le plateau de la plaine de Relizane.[26]

5.2. GÉOLOGIE LOCALE :

Le terrain étudié est formé de dépôts quaternaires récents, constitués de sables plus ou moins argileux, correspondant à d'anciennes plages émergées (niveau inférieur). Ces formations reposent sur un substratum marneux d'âge pliocène, mis en évidence grâce aux sondages carottés réalisés sur le site de la station de dessalement voisine, déjà construite à proximité de l'emplacement prévu pour la centrale électrique.

6. PROGRAMME DES RECONNAISSANCES GÉOTECHNIQUES :

Afin d'identifier la lithologie du terrain, d'évaluer son état de compacité et de déterminer les paramètres géotechniques et géophysiques en place, une campagne de reconnaissance a été réalisée sur le site. Celle-ci a inclus aussi bien des essais en laboratoire que des essais in situ.

Les essais exécutés sont :

Six (6) essais au pénétromètre au cône CPT poussés jusqu'au 22m.

Les pénétrations au cône ont été réalisées à différents endroits, la disposition des emplacements des sondages CPT est présentée dans la figure III. 2. [20]

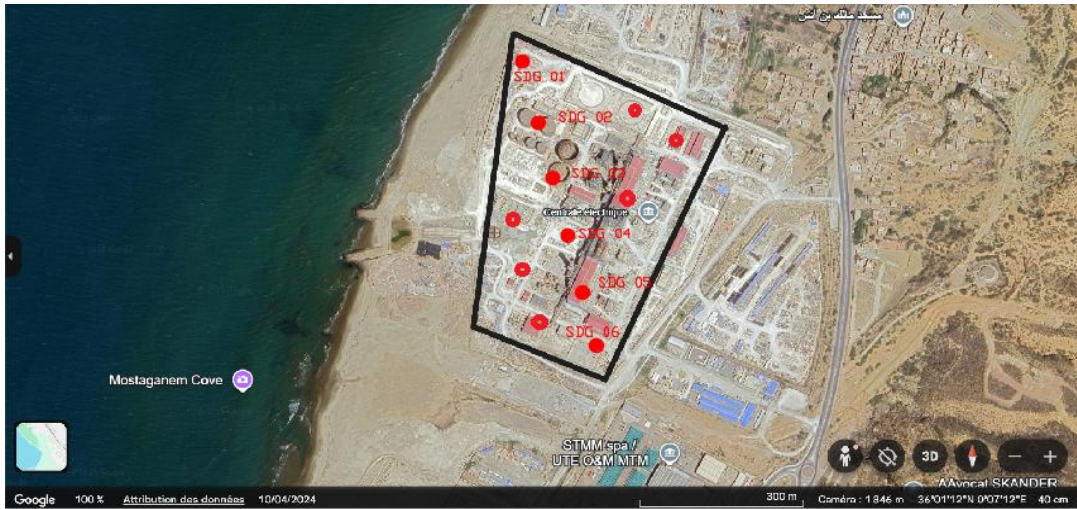


Figure III.. 4: Le plan d'implantation des sondages pour les essais CPT.

Le tableau 2 suivant montre les coordonnées géographiques et l'altitude du CPT :

CPT	X(m)	Y(m)	Elévation(m)
Sondage 01	13964	4303503	21
Sondage 02	14021	4303370	22
Sondage 03	14091	4303146	21
Sondage 04	13926	4303032	21.5
Sondage 05	14172	4303355	14
Sondage 06	13983	4303009	21

Tableau III. 1: les coordonnées géographiques et l'altitude du CPT

7. PRESENTAION DES RESULTAT CPT DU SITE :

Dans cette section, sont présentés et analysés les résultats des essais au pénétromètre statique (CPT) réalisés sur le site. Ces essais consistent à enfoncer une pointe conique dans le sol à vitesse constante afin de mesurer la résistance à la pénétration et les frottements latéraux. Les données recueillies permettent d'apprécier les caractéristiques mécaniques des sols en place.

7.1. Les résultats des essais au pénétromètre statique (CPT) :

Les données utilisées dans cette étude proviennent de sondages réalisés au pénétromètre statique.

7.1.1 Les paramètres mesures :

On a les paramètres mesures de 06 sondage :

Profondeur (m)	qc(KN)	fs (KN)	Profondeur (m)	qc(KN)	fs (KN)
1	4540	198,66667	12	3320	1480
2	5910	390	13	6320	2208
3	5080	966	14	8570	1472
4	4050	1208,6667	15	1950	3099,3333
5	3090	1166,6667	16	3710	1582
6	3500	695,33333	17	790	3532,6667
7	6530	1233,3333	18	690	1662
8	10130	1058	19	2000	3390,6667
9	4200	2466	20	1220	1952
10	2140	1253,3333	21	8730	3366,6667
11	5250	2054,6667	21,22	15880	1524,6667

Tableau III. 2 : les paramètres mesures de sondage N01

Profondeur (m)	qc(KN)	fs (KN)	Profondeur (m)	qc(KN)	fs (KN)
1	7460	372	12	4940	996,66667
2	5670	1058	13	5440	1995,3333
3	4810	639,33333	14	6860	1176,6667
4	4830	1340	15	1520	2815,3333
5	1460	1090,6667	16	920	1320,6667
6	3320	992	17	1060	3024
7	3610	1045,3333	18	1660	1368
8	5410	879,33333	19	850	3256
9	4720	1368	20	2430	1538
10	4340	977,33333	21	980	3638
11	4440	1738,6667	22	10980	1060

Tableau III. 3 : les paramètres mesures de sondage N02

Profondeur (m)	qc(KN)	fs (KN)	Profondeur (m)	qc(KN)	fs (KN)
1	7770	204,6667	12	4820	2156,6667
2	6180	1250,0000	13	5970	1040,0000
3	4570	443,3333	14	5170	2776,0000
4	3660	1848,6667	15	1050	1578,0000
5	3620	665,3333	16	1510	3060,0000
6	4570	1752,6667	17	4160	1457,3333
7	6080	597,3333	18	870	3624,6667
8	7300	1534,6667	19	4410	1371,3333
9	710	1882,0000	20	510	4135,3333
10	1600	1672,0000	21	650	1472,6667
11	3820	1105,3333			

Tableau III. 4 : les paramètres mesures de sondage N03

Profondeur (m)	fs (KN)	qc(KN)	Profondeur (m)	fs (KN)	qc(KN)
1	41,333333	5070	12	340,66667	6300
2	319,33333	7200	13	2000	5180
3	934	3310	14	660	7040
4	529,33333	550	15	2559,3333	5250
5	1222	3250	16	1293,3333	1460
6	543,33333	3730	17	2864	2570
7	1487,3333	3500	18	1500	1240
8	798	3680	19	3170	830
9	1608,6667	460	20	1734,6667	1760
10	464,66667	5860	21	3281,3333	640
11	1765,3333	6270			

Tableau III. 5 : les paramètres mesures de sondage N04

Profondeur	fs (KN)	qc(KN)	Profondeur	fs (KN)	qc(KN)
1	212,66667	3280	8	1433,3333	5970
2	432,66667	10780	9	1499,3333	12670
3	1385,3333	7060	10	2955,3333	4590
4	806	8360	11	1828	8870
5	1732	9190	12	2964,6667	7940
6	1213,3333	6470	13	2594,6667	2550
7	1474,6667	4800	14	2895,3333	7650

Tableau III. 6 : les paramètres mesures de sondage N05

Profondeur (m)	fs (KN)	qc(KN)	Profondeur (m)	fs (KN)	qc(KN)
1	84	2220	12	956,66667	7050
2	548	6250	13	1992	5390
3	624	4140	14	2045,3333	1060
4	744	4180	15	1820	4300
5	1012,6667	2820	16	2456,6667	970
6	930,66667	3510	17	2062,6667	1150
7	1188,6667	1700	18	2556	4750
8	1144	5800	19	2690	6030
9	1401,3333	1680	20	3169,3333	750
10	954,66667	4660	21	2767,3333	890
11	1716	5560			

Tableau III. 7 les paramètres mesures de sondage N06

7.1.2 Rapport de friction Rf (%) :

$$Rf = (fs \setminus qc) \times 100 \quad (III.1)$$

Profondeur (m)	qc(KN)	fs (KN)	Rf (%)	Profondeur (m)	qc(KN)	fs (KN)	Rf (%)
1	4540	198,6667	4,3759	12	3320	1480,0000	44,5783
2	5910	390,0000	6,5990	13	6320	2208,0000	34,9367
3	5080	966,0000	19,0157	14	8570	1472,0000	17,1762
4	4050	1208,6667	29,8436	15	1950	3099,3333	158,9402
5	3090	1166,6667	37,7562	16	3710	1582,0000	42,6415
6	3500	695,3333	19,8667	17	790	3532,6667	447,1730
7	6530	1233,3333	18,8872	18	690	1662,0000	240,8696
8	10130	1058,0000	10,4442	19	2000	3390,6667	169,5333
9	4200	2466,0000	58,7143	20	1220	1952,0000	160,0000
10	2140	1253,3333	58,5670	21	8730	3366,6667	38,5643
11	5250	2054,6667	39,1365	21,22	15880	1524,6667	9,6012

Tableau III. 8 : résultat de rapport de friction de sondage 01

Profondeur	qc(KN)	fs (KN)	Rf(%)	Profondeur	qc(KN)	fs (KN)	Rf(%)
------------	--------	---------	-------	------------	--------	---------	-------

(m)				(m)			
1	7460	372	4,9866	12	4940	996,6666	20,1754
2	5670	1058	18,6596	13	5440	1995,3333	36,6789
3	4810	639,3333	13,2918	14	6860	1176,666	17,1526
4	4830	1340	27,7433	15	1520	2815,333	185,2193
5	1460	1090,666	74,7032	16	920	1320,666	143,5507
6	3320	992	29,8795	17	1060	3024	285,2830
7	3610	1045,333	28,9566	18	1660	1368	82,4096
8	5410	879,3333	16,2539	19	850	3256	383,0588
9	4720	1368	28,9831	20	2430	1538	63,2922
10	4340	977,3333	22,5192	21	980	3638	371,2245
11	4440	1738,666	39,1592	22	10980	1060	9,6539

Tableau III. 9 : résultat de rapport de friction de sondage 02

Profondeur (m)	qc(KN)	fs (KN)	Rf(%)	Profondeur (m)	qc(KN)	fs (KN)	Rf(%)
1	7770	204,6667	2,6341	12	4820	2156,666	44,744
2	6180	1250	20,2265	13	5970	1040	17,420
3	4570	443,3333	9,7009	14	5170	2776	53,694
4	3660	1848,6667	50,51	15	1050	1578	150,28
5	3620	665,3333	18,3794	16	1510	3060	202,64
6	4570	1752,6667	38,3516	17	4160	1457,33	35,032
7	6080	597,3333	9,8246	18	870	3624,66	416,62
8	7300	1534,6667	21,0228	19	4410	1371,33	31,096
9	710	1882	265,0704	20	510	4135,33	810,84
10	1600	1672	104,5	21	650	1472,66	226,56
11	3820	1105,3333	28,9354				

Tableau III. 10 : résultat de rapport de friction de sondage 03

Profondeur	fs (KN)	qc(KN)	Rf(%)	Profondeur	fs (KN)	qc(KN)	Rf(%)
1	41,33333	5070	0,8153	12	340,666	6300	5,4074
2	319,3333	7200	4,4352	13	2000	5180	38,6100
3	934	3310	28,2175	14	660	7040	9,3750
4	529,3333	550	96,2424	15	2559,33	5250	48,7492
5	1222	3250	37,6000	16	1293,33	1460	88,5845
6	543,3333	3730	14,5666	17	2864	2570	111,439
7	1487,333	3500	42,4952	18	1500	1240	120,967
8	798	3680	21,6848	19	3170	830	381,927
9	1608,666	460	349,7101	20	1734,66	1760	98,5606
10	464,6666	5860	7,9295	21	3281,33	640	512,708
11	1765,333	6270	28,1552				

Tableau III. 11 : résultat de rapport de friction de sondage 04

Profondeur	fs (KN)	qc(KN)	Rf(%)	Profondeur	fs (KN)	qc(KN)	Rf(%)
1	212,6666	3280	6,4837	8	1433,333	5970	24,0089
2	432,6666	10780	4,0136	9	1499,333	12670	11,8337
3	1385,333	7060	19,622	10	2955,333	4590	64,3863
4	806	8360	9,6411	11	1828	8870	20,6088
5	1732	9190	18,846	12	2964,666	7940	37,3384
6	1213,333	6470	18,753	13	2594,666	2550	101,7516
7	1474,666	4800	30,722	14	2895,333	7650	37,8475

Tableau III. 12 : résultat de rapport de friction de sondage 05

profondeur	fs (KN)	qc(KN)	Rf(%)	profondeur	fs (KN)	qc(KN)	Rf(%)
1	84	2220	3,7838	12	956,66667	7050	13,5697
2	548	6250	8,7680	13	1992	5390	36,9573
3	624	4140	15,0725	14	2045,3333	1060	192,9560
4	744	4180	17,7990	15	1820	4300	42,3256
5	1012,6667	2820	35,9102	16	2456,6667	970	253,2646
6	930,66667	3510	26,5147	17	2062,6667	1150	179,3623
7	1188,6667	1700	69,9216	18	2556	4750	53,8105
8	1144	5800	19,7241	19	2690	6030	44,6103
9	1401,3333	1680	83,4127	20	3169,3333	750	422,5778
10	954,66667	4660	20,4864	21	2767,3333	890	310,9363
11	1716	5560	30,8633				

Tableau III. 13 : résultat de rapport de friction de sondage 06

7.1.3 Classification des sols selon Robertson :

Les tableaux suivant représenté la classification des sols selon Robertson :

Profondeur (approximative)	Rf (%)	Classification Robertson probable
----------------------------	--------	-----------------------------------

Profondeur (approximative)	Rf (%)	Classification Robertson probable
0 – 1 m	4.38	Limon / limon argileux
1 – 2 m	6.60	Argile plastique
2 – 3 m	19.01	Argile / sol fin
3 – 4 m	29.84	Argile plastique / molle
4 – 5 m	37.76	Argile plastique à organique
5 – 6 m	19.87	Argile
6 – 7 m	18.89	Limon argileux à argile
7 – 8 m	10.44	Sable très dense à limoneux
8 – 9 m	58.71	Tourbe / sol organique
9 – 10 m	58.57	Tourbe / argile très molle
10 – 11 m	39.14	Argile plastique à tourbeuse
11 – 12 m	44.58	Argile molle à tourbeuse
12 – 13 m	34.94	Argile plastique
13 – 14 m	17.18	Sable compact à limon argileux
14 – 15 m	158.94	Tourbe / sol très organique
15 – 16 m	42.64	Argile organique probable
16 – 17 m	447.17	Tourbe extrême / anomalie possible
17 – 18 m	240.86	Tourbe très molle / organique
18 – 19 m	169.53	Tourbe ou argile très organique
19 – 20 m	160	Tourbe ou argile molle
20 – 21 m	38.56	Sable fin à limoneux
21 – 22 m	9.60	Sable dense à très dense

Tableau III. 14 : Classification Robertson de sondage 01

Profondeur (m)	Rf (%)	Classification Robertson
1	4,9866	Sable propre (très propre, sec ou dense)
2	18,6596	Sable propre
3	13,2918	Sable propre
4	27,7433	Sable propre à très légèrement limoneux
5	74,7032	Sable légèrement limoneux
6	29,8795	Sable propre à très légèrement limoneux
7	28,9566	Sable propre à très légèrement limoneux
8	16,2539	Sable propre
9	28,9831	Sable légèrement limoneux
10	22,5192	Sable légèrement limoneux
11	39,1592	Sable limoneux à finement argileux
12	20,1754	Sable légèrement limoneux
13	36,6789	Limon fin / sable fin argileux
14	17,1526	Sable propre à légèrement limoneux
15	185,2193	Limon fin à argile très plastique
16	143,5507	Sable argileux à limon fin
17	285,2830	Limon fin à inclusions argileuses
18	82,4096	Sable limoneux
19	383,0588	Sol fin cohésif — argile probable
20	63,2922	Sable limoneux
21	371,2245	Sol fin cohésif — argile probable
22	9,6539	Sable propre dense (couche favorable)

Tableau III. 15 : Classification Robertson de sondage 02

Profondeur (m)	Rf (%)	Classification Robertson probable
1	2,63	Sable propre dense
2	20,23	Sable propre à légèrement limoneux
3	9,70	Sable propre
4	50,51	Sable limoneux / sol fin
5	18,38	Sable propre à légèrement limoneux
6	38,35	Sable limoneux / sol fin
7	9,82	Sable propre
8	21,02	Sable propre à légèrement limoneux
9	265,07	Tourbe / sol organique très mou
10	104,50	Sol très fin cohésif / argile molle
11	28,94	Sable limoneux à finement argileux
12	44,74	Sable limoneux / argile sableuse
13	17,42	Sable propre à légèrement limoneux
14	53,69	Sable limoneux / sol fin
15	150,29	Limon fin à argile plastique
16	202,65	Argile / sol très mou organique
17	35,03	Sable limoneux / argile sableuse
18	416,63	Sol organique / tourbe extrême
19	31,10	Sable limoneux / argile molle
20	810,85	Tourbe / sol organique très mou
21	226,56	Tourbe / sol organique très mou

Tableau III. 16 : Classification Robertson de sondage 03

Profondeur	Rf (%)	Classification Robertson probable
1	0,82	Sable propre dense
2	4,44	Sable propre à légèrement limoneux
3	28,22	Sable propre dense
4	96,24	Argile molle / sol fin
5	37,60	Sable limoneux / sol fin
6	14,57	Sable propre / légèrement limoneux
7	42,50	Sable limoneux / sol fin
8	21,68	Sable propre à légèrement limoneux
9	349,71	Tourbe / sol organique très mou
10	7,93	Sable propre à légèrement limoneux
11	28,16	Sable limoneux / sol fin
12	5,41	Sable propre
13	38,61	Sable limoneux / sol fin
14	9,38	Sable propre à légèrement limoneux
15	48,75	Sable limoneux dense
16	88,58	Argile molle / sol fin
17	111,44	Tourbe / sol organique très mou
18	120,97	Tourbe / sol organique très mou
19	381,93	Tourbe / sol organique très mou
20	98,56	Argile molle / sol très mou
21	512,71	Tourbe / sol organique très mou

Tableau III. 17 Classification Robertson de sondage 04

Profondeur (m)	Rf (%)	Classification Robertson probable
1	6,48	Sable propre dense
2	4,01	Sable propre / légèrement limoneux
3	19,62	Sable propre dense
4	9,64	Sable propre / légèrement limoneux
5	18,85	Sable limoneux / sol fin
6	18,75	Sable limoneux / sol fin
7	30,72	Sable limoneux dense
8	24,01	Sable limoneux / sol fin
9	11,83	Sable propre dense
10	64,39	Sable limoneux / horizon fin plus cohésif
11	20,61	Sable limoneux / sol fin
12	37,34	Sable limoneux dense
13	101,75	Tourbe / sol organique très mou
14	37,85	Sable limoneux dense

Tableau III. 18 : Classification Robertson de sondage 05

Profondeur (m)	Rf (%)	Classification Robertson probable
1	3,78	Sable propre dense
2	8,77	Sable propre / légèrement limoneux
3	15,07	Sable propre / limoneux
4	17,80	Sable limoneux / sol fin
5	35,91	Sable limoneux / sol fin
6	26,51	Sable limoneux / sol fin
7	69,92	Argile molle / sol fin
8	19,72	Sable propre / limoneux
9	83,41	Argile molle / sol fin
10	20,49	Sable limoneux / sol fin
11	30,86	Sable limoneux / sol fin
12	13,57	Sable propre / limoneux
13	36,96	Sable limoneux / sol fin
14	192,96	Tourbe / sol organique très mou
15	42,33	Sable limoneux dense
16	253,26	Tourbe / sol organique très mou
17	179,36	Tourbe / sol organique très mou
18	53,81	Sable limoneux / sol fin cohésif
19	44,61	Sable limoneux dense
20	422,58	Tourbe / sol organique très mou
21	310,94	Tourbe / sol organique très mou

Tableau III. 19 : Classification Robertson de sondage 06

7.1.4 Interprétation des résultats :

Les résultats des sondages CPT montrent qu'entre 0 et ± 8 m, le sol est dominé par des matériaux fins à comportement argileux ou limoneux, constitués d'une alternance d'argiles plastiques, de limons argileux et de sols fins, avec quelques horizons sableux mais généralement limoneux.

Cette couche superficielle présente une résistance faible à moyenne, avec des valeurs du rapport de friction R_f généralement comprises entre 15 % et 40 %, traduisant un comportement compressible et globalement peu favorable au port.

Entre ± 8 m et ± 22 m apparaît une zone caractérisée par une forte présence de tourbe et de sols organiques très mous, identifiée par des valeurs exceptionnellement élevées de R_f (souvent > 100 %, et parfois > 400 %) ainsi que par des résistances de pointe q_c très faibles, souvent inférieures à 1 MPa.

Cette couche organique, continue sur l'ensemble des sondages, se présente sous forme de une à trois strates selon le point investigué.

Au-delà de 20 m de profondeur, les profils montrent un retour à des matériaux plus compétents, principalement des sables denses, caractérisés par des valeurs de q_c très élevées, généralement comprises entre 7000 et 15000 kN/m², ainsi que par un rapport de friction faible ($R_f < 10$ %), révélant un sol plus résistant et favorable pour le port et les fondations profondes.

8 L'Analyse Géospatiale Prédictive de la Variabilité des CPT :

Cette approche permet d'évaluer et de prévoir comment les paramètres du sol, mesurés par les sondages CPT (résistance de pointe q_c et frottement latéral f_s), varient spatialement dans la zone d'étude. En utilisant les relations entre les points de mesure existants, on peut estimer les valeurs à des emplacements non sondés.

8.1 Méthodologie :

Les données CPT (q_c et f_s) et les coordonnées des sondages sont collectées pour permettre une analyse géostatistique. Afin de limiter les coûts de forage, les paramètres des sondages SDG02 et SDG05 sont estimés à partir des sondages voisins SDG1, SDG3, SDG4 et SDG6, positionnés dans un système cartésien local avec un espacement de 25 m.

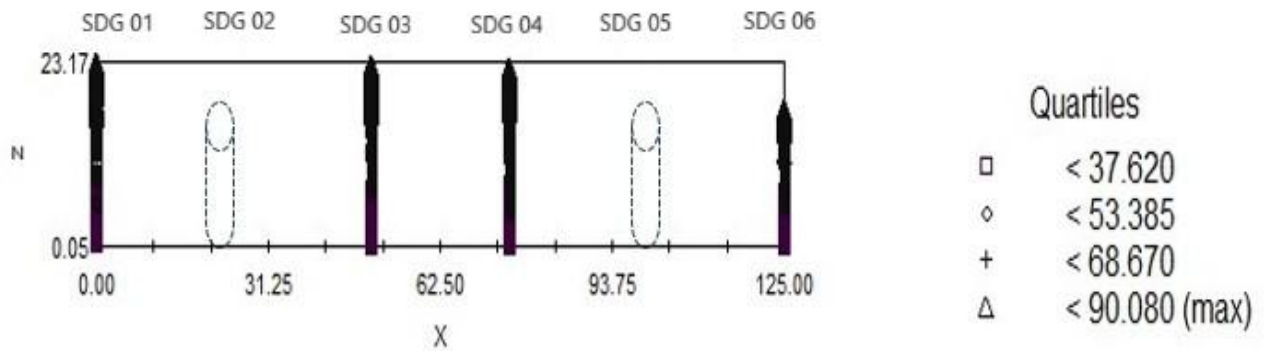


Figure III.. 5: Disposition des forages avec coordonnées dans un système cartésien.

8.2 Résultats et discussion :

8.2.1 Analyse Statistique :

Le tableau statistique des données CPT met en évidence la variabilité des paramètres du sol.

Le frottement latéral (f_s) présente une moyenne de 51,42 kPa avec une variabilité modérée, et une distribution légèrement asymétrique indiquant peu de valeurs extrêmes. En revanche, la résistance de pointe (q_c), dont la moyenne est de 8,41 MPa, montre une variabilité beaucoup plus élevée et une distribution fortement asymétrique à droite, révélant la présence de quelques valeurs exceptionnellement élevées dans le sol.

Paramètre	Moyenne	Écart-type	Variance de l'échantillon	Valeur minimale	Valeur maximale	Asymétrie	Kurtosis
Frottement latéral (f_s)	51,4229	21,2879	453,17	0,1	90,08	-0,37	-0,51
Résistance de pointe (q_t)	8,4089	8,7749	76,9981	0,18	57,19	2,35 (0,07)	6,71 (0,14)

Tableau III. 6 : Analyse statistique du frottement latéral et de la résistance de pointe du cône

8.2.2 Histogramme :

Les histogrammes sont essentiels pour visualiser la distribution des données CPT (q_c et f_s). Ils permettent d'analyser la fréquence des valeurs, d'identifier les asymétries et de révéler la variabilité naturelle du sol. Dans cette étude, les histogrammes ont mis en évidence la nature hétérogène du sol et ont guidé les transformations des données nécessaires pour l'analyse géostatistique.

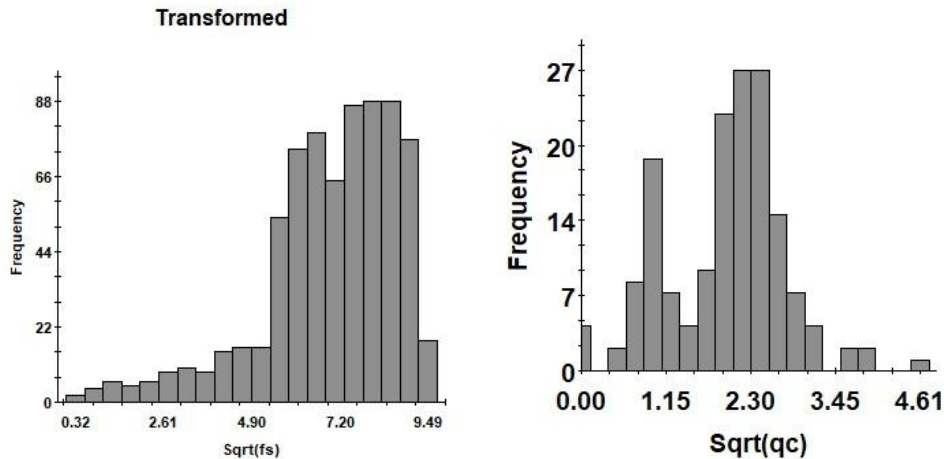


Figure III.. 6: Histogramme du fs et de qc.

8.2.3 Transformations :

Afin de réaliser une analyse géostatistique, l'exigence principale est d'avoir des données stationnaires.

Cependant, les sols hétérogènes sont très variables avec des propriétés changeantes le long du profil du sous-sol. Cela apporte une limitation à l'application de la géostatistique dans le domaine de l'ingénierie géotechnique.

Dans un tel cas, une approche est d'appliquer une transformation aux données ; afin que les données se comportent de manière proche de la stationnarité.

8.2.4 Modélisation du Variogramme de q_c et f_s :

Le variogramme permet d'analyser la continuité spatiale du frottement latéral et de la résistance de pointe du cône.

Les variogrammes expérimentaux, calculés pour différentes distances et directions en considérant le sol comme anisotrope, montrent que le modèle gaussien offre le meilleur ajustement, avec un faible effet de pépite, une forte proportion de variabilité structurée et des R^2 élevés.

Les variogrammes augmentent rapidement à courte distance (forte corrélation spatiale) puis se stabilisent à plus grande distance (corrélation faible).

Les caractéristiques des variogrammes dépendent des conditions de dépôt du sol, de l'historique de chargement et de la proportion de fines.

Le palier du variogramme indique la distance au-delà de laquelle la corrélation spatiale devient négligeable.

Model Type	Nugget c_0	Partial Still $C+C_0$	Major range a (m)	$C/C+C_0$	RSS	R^2
Modèle de variogramme anisotrope pour le frottement latéral (f_s)						
Spherical	1	912.9	46.83	1	266812	0.85
Exponential	1	912.9	25.85	1	349996	0.80
Linear	1	912.8	31.77	1	243271	0.87
Gaussian	1	912.9	18.27	1	101882	0.92
Modèle de variogramme anisotrope pour la résistance de pointe du cône (q_c)						
Spherical	3.62	32.59	51	0.889	239	0.64
Exponential	3.8	37.6	34.67	0.889	264	0.65
Linear	3.63	19.55	19.4	0.814	72.6	0.66
Gaussian	3.56	43	26.6	0.86	169	0.75

Tableau III. 20 : Variogramme anisotrope pour f_s et q_c

8.2.5 Variogramme Anisotrope :

La figure III. 7 présente le variogramme anisotrope du frottement latéral et de la résistance de pointe du cône.

Les courbes montrent que la semi-variance augmente d'abord rapidement avec la distance entre les points, ce qui traduit une forte corrélation spatiale à courte distance. Cette corrélation diminue progressivement à mesure que la distance augmente.

L'absence de palier clair suggère que la corrélation spatiale ne se limite pas à la distance maximale observée, indiquant que l'influence spatiale pourrait s'étendre sur une large portée.

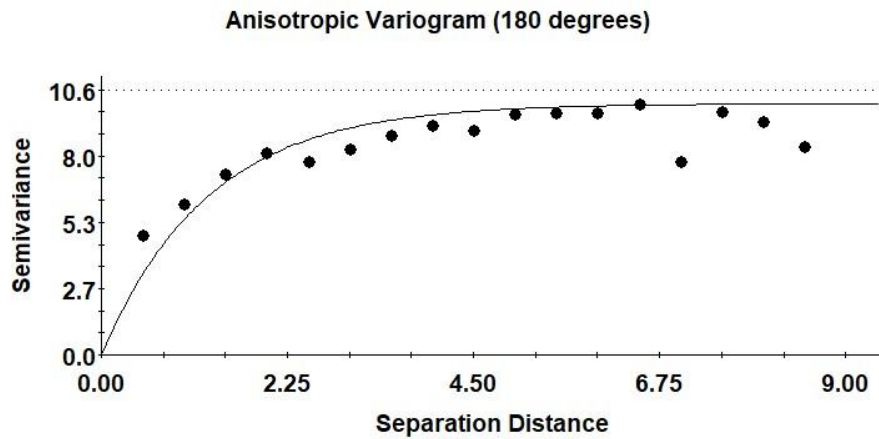
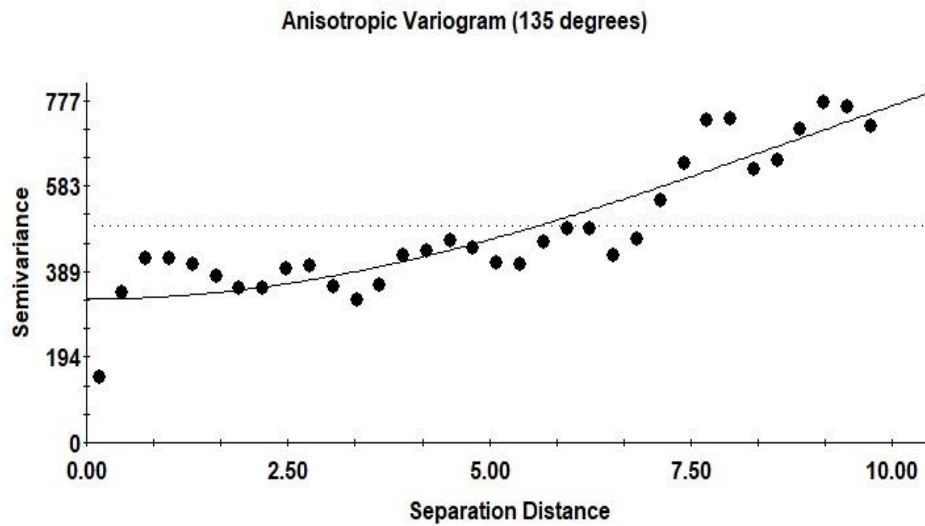


Figure III.. 7: Variogramme anisotrope de qc.



8.2.6 Validation Croisée :

Une technique appelée validationcroisée a été réalisée pour valider le modèle de variabilité spatiale.

Cette méthode consiste à supprimer les valeurs réelles et à effectuer une analyse de krigeage afin de générer une nouvelle carte sur l'ensemble de la zone.

Les résultats obtenus ont montré une bonne valeur du coefficient de détermination R^2 , en tenant compte de l'anisotropie du variogramme.

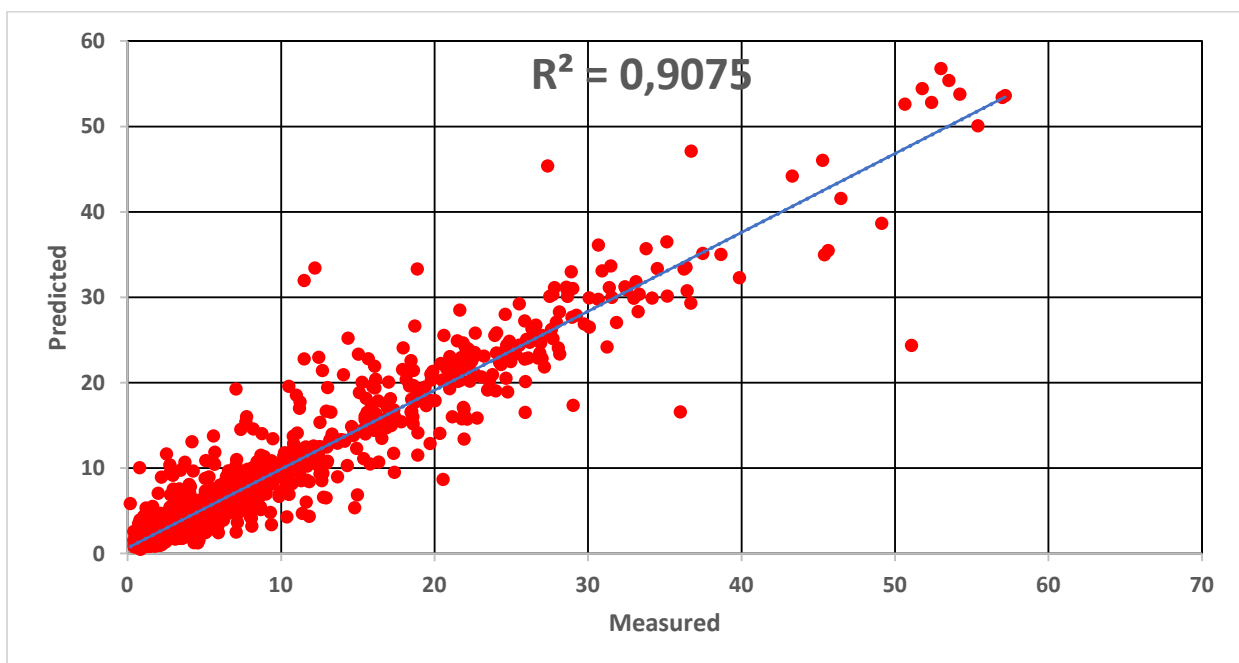
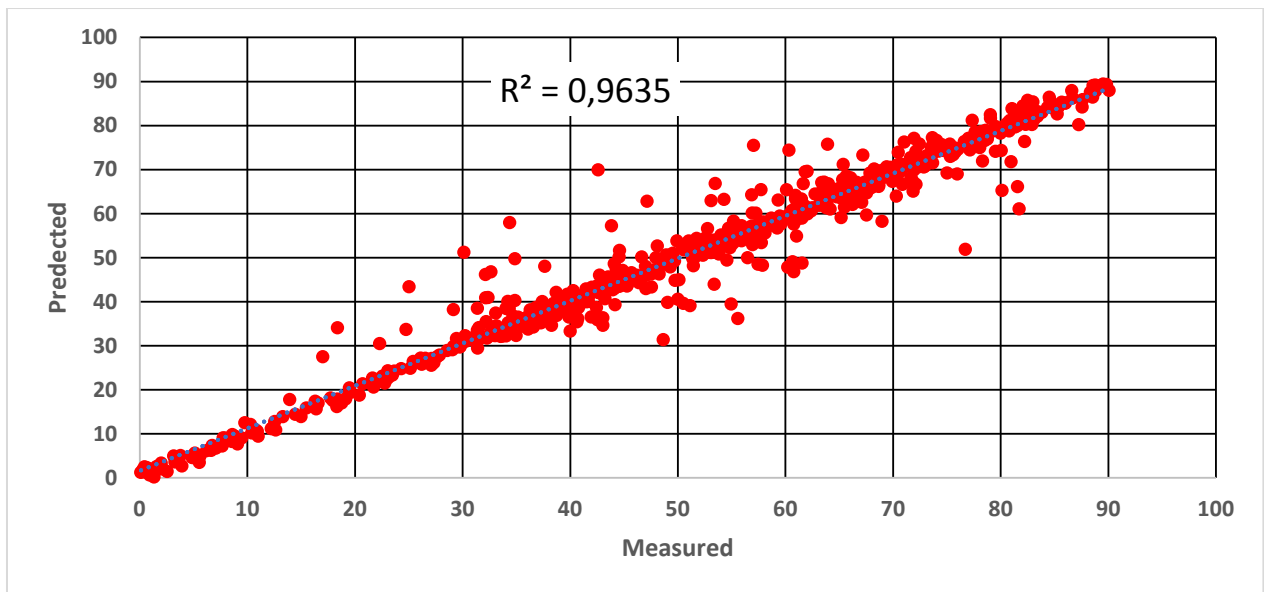


Figure III.. 8: Validation croisée du modèle semi-variogramme pour le frottement latéral et la résistance de pointe du cône.

8.2.7 Analyse par Krigeage :

L'estimation du frottement latéral et de la résistance de pointe du cône dans des zones non sondées a été réalisée à l'aide du krigeage ordinaire, en se basant sur les modèles spatiaux issus du variogramme.

Deux points de forage ont été retirés pour tester la méthode, et des cartes de contours ont été générées pour représenter la distribution spatiale de f_s et q_c .

Les résultats montrent une répartition détaillée, avec f_s variant entre 5,9 et 80,9 degrés et q_c entre 1,3 et 15,9 MPa, permettant de visualiser la variabilité spatiale du sol. valeurs de f_s varient entre 5,9 et 80,9 degrés, tandis que celles de q_c se situent entre 1,3 et 15,9 MPa.

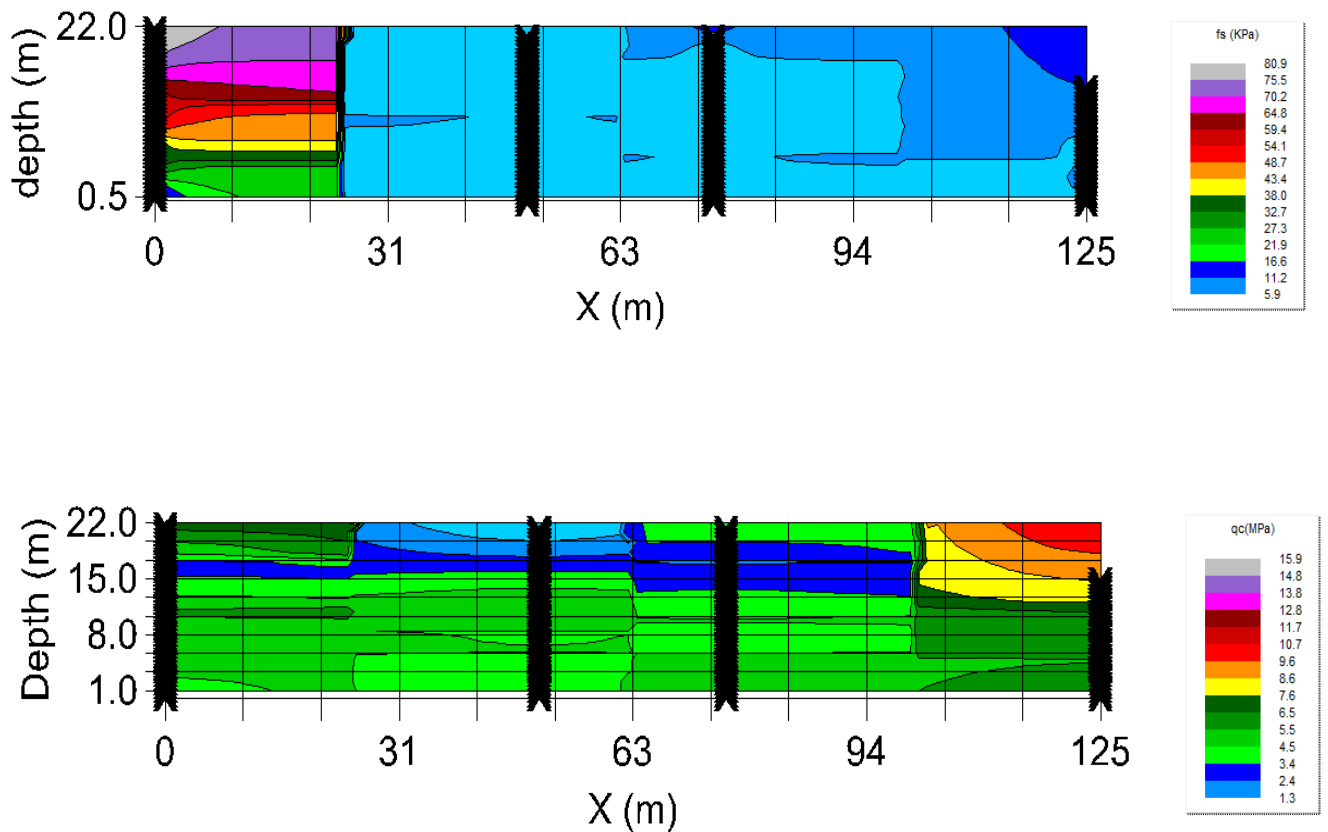


Figure III.. 9: Carte de Contours des valeurs de frottement latéral et de résistance de pointe du cône obtenues par analyse de krigeage.

Le graphique en contours colorés de la figure représente les valeurs de l'écart-type (SD) pour le frottement latéral (f_s) et la résistance de pointe du cône (q_c), permettant d'évaluer la fiabilité des estimations interpolées selon la profondeur et la distance horizontale.

Les zones présentant des valeurs de SD élevées indiquent une plus grande incertitude, généralement due à un faible nombre de données ou à une forte variabilité locale, tandis que les zones à SD faible correspondent à des prédictions plus fiables.

Les valeurs de SD varient entre 1,8 et 26 pour f_s et entre 0,33 et 5,01 pour q_c . Cette analyse de la variabilité spatiale est essentielle pour quantifier le niveau de confiance dans les propriétés géotechniques et guider l'évaluation des risques liés au comportement du sol.

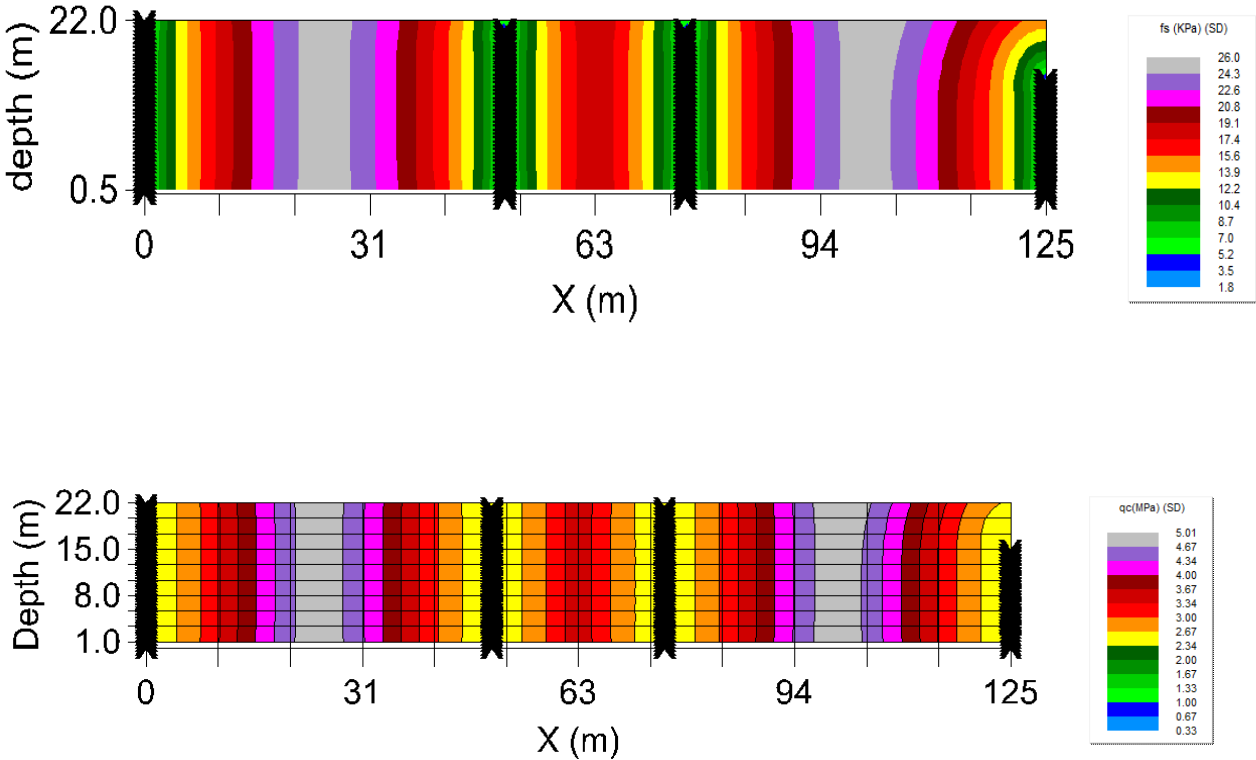


Figure III.. 10: Les valeurs de l'écart-type (SD) pour le frottement latéral f_s et la résistance de pointe q_c .

8.3 Comparaison des résultats :

Les figures suivantes montrent la comparaison entre les valeurs estimées et les valeurs calculés de la résistance à la pointe (q_c) et de la friction de manchon (f_s).

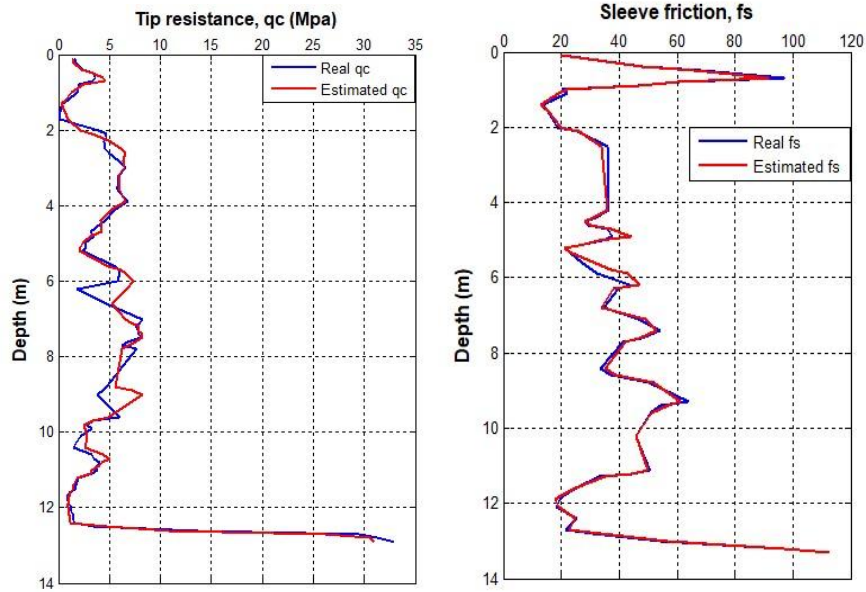


Figure III. 11: Comparaison des paramètres géotechniques réels et estimés par krigeage (qc, fs) aux point SDG 2.

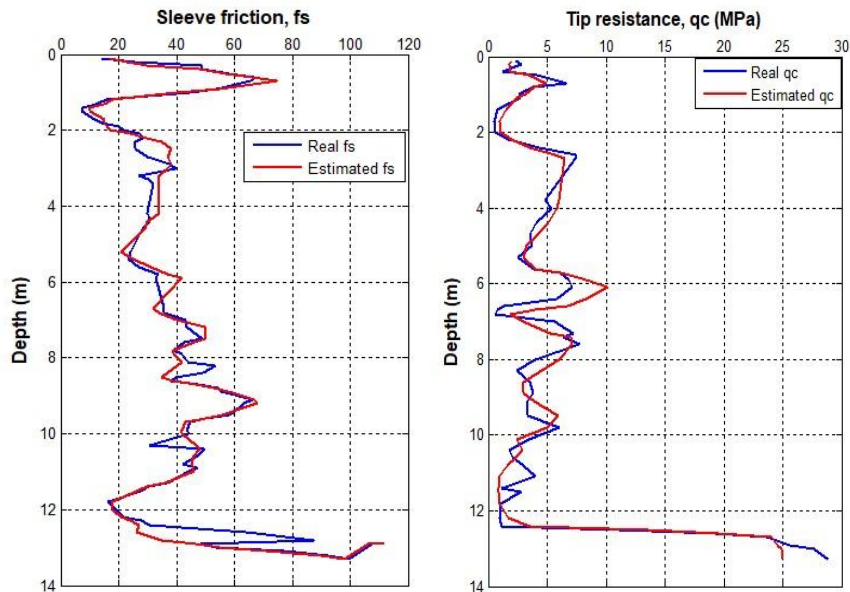


Figure III. 12: Comparaison des paramètres géotechniques réels et estimés par krigeage (qc, fs) aux point SDG 5.

Les profils calculés pour la résistance à la pointe (qc) capturent avec précision les principales couches de sol et les variations de résistance, correspondant étroitement aux valeurs réelles à la plupart des profondeurs (0–14 m).

L'estimateur est particulièrement efficace pour détecter les changements brusques à des profondeurs de 2 m, 6 m et 12 m.

Bien que les estimations par krigeage pour la friction latéral (f_s) indiquent une forte corrélation générale, il existe certains écarts par rapport aux valeurs réelles, notamment dans les couches supérieures (0–4 m) et à certains pics autour de 6–8 m de profondeur.

Cela implique que, comparée à d'autres facteurs, la friction latéral (f_s) peut présenter une variabilité spatiale plus importante.

9 Conclusion :

Ce chapitre présente l'étude géotechnique du site de Mostaganem à partir des essais CPT réalisés en six points.

Les résultats montrent une stratification marquée : une couche superficielle limono-argileuse, une zone intermédiaire très organique et peu résistante, puis des sables denses en profondeur offrant de bonnes capacités portantes.

L'analyse géostatistique, basée sur les variogrammes et le krigeage ordinaire, a permis de modéliser la variabilité spatiale des paramètres q_c et f_s et de produire des cartes d'estimation fiables.

Ces résultats apportent une compréhension précise du comportement du sol et constituent une base essentielle pour la conception des fondations sur ce site.

Conclusion générale :

L'étude réalisée a permis de mettre en évidence l'importante variabilité géologique et géotechnique des sols du site à partir des données issues des essais de pénétration statique CPT.

L'analyse détaillée des paramètres q_c , f_s et R_f a révélé une stratification complexe, marquée par une alternance de couches fines argileuses et limoneuses en surface, suivies d'un niveau particulièrement compressible composé de tourbe et de sols organiques très mous, avant d'atteindre des matériaux plus denses en profondeur.

Cette hétérogénéité, aussi bien verticale qu'horizontale, a été confirmée et quantifiée par l'approche géostatistique, notamment grâce aux variogrammes qui ont permis d'évaluer les longueurs de corrélation et les zones présentant un degré d'incertitude élevé.

L'intégration conjointe des résultats CPT et des outils géostatistiques a conduit à une modélisation plus fiable du sol, améliorant ainsi la compréhension du comportement géomécanique des différentes couches rencontrées.

Ces informations sont essentielles pour la conception géotechnique, en particulier dans les secteurs dominés par des sols organiques très compressibles où les risques de tassements, d'instabilité ou de faible portance sont significatifs.

En définitive, cette étude confirme l'importance des techniques d'investigation avancées et de l'analyse spatiale dans l'évaluation géotechnique des sites complexes.

L'approche adoptée offre une base solide pour de futures études, notamment celles portant sur la liquéfaction, la modélisation 3D du sous-sol ou l'optimisation des fondations dans les environnements à forte hétérogénéité.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ✚ Al-Atroush, M. E., & Benahchilif, S., *Optimizing Geotechnical Investigations Through Predictive Geo-Spatial Analysis of CPT Variability*. [20]
- ✚ Armstrong, M. (1998). *Basic Linear Geostatistics*. Springer. [17]
- ✚ Bensaïd, A. (2012). *Caractéristiques géotechniques des sols du nord de l'Algérie*. Revue Algérienne des Sciences de la Terre. [25]
- ✚ Bendaoudi, L., & Abid, S. A. M., *Comparaison entre les méthodes de détermination du potentiel de liquéfaction*. [24]
- ✚ Bowles, J. E. (1996). *Foundation Analysis and Design*. [4]
- ✚ BRGM (2006). *Géologie de l'Algérie : synthèse*. Bureau de Recherches Géologiques et Minières. [25]
- ✚ Chilès, J.-P., & Delfiner, P. (2012). *Geostatistics: Modeling Spatial Uncertainty*. Wiley. [15]
- ✚ Das, B. M. (2013). *Principles of Geotechnical Engineering*. [1]
- ✚ Gamma Design Software (2010). *GS+ Geostatistics for Environmental Sciences*. [21]
- ✚ Google Earth (2024). *Satellite Imagery and Site Localization*. [22]
- ✚ Goovaerts, P. (1997). *Geostatistics for Natural Resources Evaluation*. Oxford University Press. [19]
- ✚ Hobbs, N. B. (1986). *Mire Morphology and Soil Properties*. [3]
- ✚ Isaaks, E. H., & Srivastava, R. M. (1989). *An Introduction to Applied Geostatistics*. Oxford University Press. [18]
- ✚ Journel, A. G., & Huijbregts, C. (1978). *Mining Geostatistics*. Academic Press. [16]
- ✚ Lunne, T., Robertson, P.K., & Powell, J.J.M. (1997). *Cone Penetration Testing in Geotechnical Practice*. [5]
- ✚ Mathéron, G. (1963). *Les variables régionalisées et leur estimation*. [13]
- ✚ [Mathéron, G. (1965). *La théorie des variables régionalisées et ses applications*. [14]
- ✚ Robertson, P. (1986). [8]
- ✚ Robertson, P. (2010). [9]
- ✚ Senous, A., *Étude géostatistique de la liquéfaction du sol*. [23]
- ✚ Terzaghi, K., Peck, R. B., & Mesri, G. (1996). *Soil Mechanics in Engineering Practice*. [2]
- ✚ ISO 22476-1 (2012). [10]
- ✚ ISO 17892-12 (2012). [12]
- ✚ ASTM D5778 (2012). [11]