



République Algérienne Démocratique et populaire
Ministère de l'Enseignement supérieur et la Recherche
Scientifique



Université Larbi Tebessi-Tébessa
Faculté des Sciences Exactes et des Sciences de la Nature et de la Vie
Département des Sciences de la Terre et de l'Univers

Mémoire de Master

Domaine : Science de la Terre et de l'Univers

Filière : Géologie

Option : Géologie de l'Ingénieur et Géotechnique

Thème :

Apport de l'analyse statistique pour la caractérisation géotechnique des sols

Présenté par :

Abid Souad
Sakher Imene

Devant le jury :

Président
Rapporteur
Examineur

Dr. Baali Fathi
Dr. Aoun Mounira
Dr. Mouici Ridha

Prof.
MCB
MCB

Université de Tébessa
Université de Tébessa
Université de Tébessa

Juin 2022

Résumé :

Peu importe l'ampleur de l'étude géotechnique du sol, les variations des propriétés physiques et mécaniques d'un point à un autre crée pourtant des incertitudes sur les valeurs représentatives des paramètres de calcul, ce qui se traduit par des incertitudes sur la prévision du comportement des ouvrages, car généralement l'échantillonnage en géotechnique est souvent limité et fragmentaire. Les incertitudes en géotechnique peuvent avoir plusieurs sources : choix de l'implantation des sondages, erreurs dans la manipulation des essais en laboratoire et de l'interprétation des données, le remaniement des échantillons (carotte) de laboratoire...etc. Et malgré le développement des méthodes numériques plus performantes de calculs et une description de sol de plus en plus proche de la réalité, il existe toujours un écart entre les résultats de calcul et les valeurs réelles. Dans le but de résoudre ce problème, le géotechnicien cherche toujours des techniques diverses tel que l'analyse statistique, dont l'objectif est de prendre en compte l'effet de la variabilité des propriétés physiques et mécaniques de sol dans les divers calculs de la mécanique de sol nécessaire à la stabilité de l'ouvrage. Le présent travail présentera une description des méthodes statistiques utilisées en géotechniques.

Mots clés : l'étude géotechnique ,erreurs dans la manipulation , méthodes numériques , résoudre les problèmes , l'analyse statistique .

ملخص :

بغض النظر عن مدى الدراسة الجيوتقنية للتربة ، فإن الاختلافات في الخواص الفيزيائية والميكانيكية من نقطة إلى أخرى تخلق مع ذلك شكوكًا حول القيم التمثيلية لمعلمات الحساب ، مما يؤدي إلى عدم اليقين في التنبؤ. سلوك الهياكل ، لأن أخذ العينات الجيوتقنية بشكل عام غالبًا ما يكون محدودًا ومجزئًا. يمكن أن يكون لعدم اليقين في التقنيات الجيوتقنية عدة مصادر: اختيار موقع الآبار ، والأخطاء في التعامل مع الاختبارات المعملية وتفسير البيانات ، وإعادة صياغة العينات المختبرية (الأساسية) ، وما إلى ذلك. وعلى الرغم من تطوير طرق حساب رقمية أكثر كفاءة ووصف التربة الذي يقترب بشكل متزايد من الواقع ، لا تزال هناك فجوة بين نتائج الحساب والقيم الحقيقية. لحل هذه المشكلة ، يبحث المهندسون الجيوتقنيون دائمًا عن تقنيات مختلفة مثل التحليل الإحصائي ، والذي يهدف إلى مراعاة تأثير تباين الخصائص الفيزيائية والميكانيكية للتربة في الحسابات المختلفة لميكانيكا التربة ضروري لاستقرار الهيكل. سيقدم هذا العمل وصفًا للطرق الإحصائية المستخدمة في الجيوتكنيك.

الكلمات المفتاحية: لدراسة الجيوتقنية ، معالجة الأخطاء ، الطرق الرقمية ، حل المشكلات ، التحليل الإحصائي.

Abstract :

Regardless of the extent of the geotechnical study of the soil , the variations of the physical and mechanical properties from one point to another nevertheless create uncertainties on the representative values of the calculation parameters, which results in uncertainties on the forecast. the behavior of structures, because generally geotechnical sampling is often limited and fragmentary. Uncertainties in geotechnics can have several sources: choice of location of the boreholes, errors in the handling of laboratory tests and interpretation of data, reworking of laboratory samples (core), etc. And despite the development of more efficient numerical calculation methods and a soil description that is increasingly close to reality, there is still a gap between the calculation results and the real values. In order to solve this problem, the geotechnical engineer always seeks various techniques such as statistical analysis, the objective of which is to take into account the effect of the variability of the physical and mechanical properties of the soil in the various calculations of the soil mechanics necessary for the stability of the structure. This work will present a description of the statistical methods used in geotechnics.

Key words :geotechnical study, handling errors, numerical methods, problem solving, statistical analysis.

Sommaire

| | |
|--|-----------|
| Remerciement | |
| Dédicace de Abid Souad | |
| Dédicace de Sakher Iman | |
| Liste des figure | |
| Liste des tableau | |
| Introduction générale | 1 |
| | |
| Chapitre I : Différentes méthodes d'analyse statistique | |
| | |
| Introduction..... | 4 |
| I. Les statistiques et probabilités en mécanique des sols | 4 |
| 1. Au stade de la reconnaissance géotechnique | 5 |
| 2. Au stade de calcul des ouvrages | 6 |
| 3. Au stade de contrôlesurl'ouvrageréalisé | 6 |
| II. Les différentes methods d'analysesstatistiquesutilisées en mécanique des sols | 6 |
| 1. Statistique descriptive | 7 |
| A. Généralités | 7 |
| B. Lois de distribution statistique | 8 |
| i. Loinormale..... | 9 |
| ii. Loi Log-Normale | 10 |
| iii. Loibêta | 10 |
| C. Tests statistiques | 11 |
| i. Test d'adéquation de Kolmogorov | 11 |
| ii. Test d'adéquation du chi 2 :loi discrete | 12 |
| III. Statistique pour caractère bi-varié | 12 |
| IV. Droite de corrélation | 13 |
| 1. Critère des moindres carrées | 13 |
| 2. Qualité de l'ajustementlinéaire entre les caractères X et Y | 14 |
| V. Statistique pour caractère multi-varié | 14 |

| | |
|---|----|
| VI. Analysefactorielle des données..... | 15 |
| VII. Analysefactorielle des correspondances (AFC) | 15 |
| VIII. Variations spatiales | 16 |
| Conclusion | 18 |

Chapitre II : La variabilité naturelle des paramètres géotechniques des sols, origine et source d'incertitude en géotechnique.

| | |
|--|----|
| Introduction | 19 |
| I. la variabilité des sols : origine, facteurs et différentes formes | 20 |
| 1. Hétérogénéité du sol | 20 |
| 2. Diversité | 21 |
| 3. Variabilité dans l'espace | 21 |
| 4. Ignorance | 22 |
| 5. L'échantillonnage | 22 |
| II. Évaluation de la variabilité spatiale des sols | 22 |
| 1. Loi de distribution | 26 |
| 2. Coefficient de variation | 26 |
| 3. Champ aléatoire | 27 |
| A. Homogénéité | 28 |
| B. Isotrope | 28 |
| C. Stationnarité (Invariabilité) | 28 |
| 4. Fonction d'autocorrélation et échelle de fluctuation | 28 |
| III. Origine et source d'incertitudes en géotechnique..... | 29 |
| 1. Incertitudes passives ou épistémique | 29 |
| A. Erreurs d'observations | 30 |
| i. Les erreurs de mesure | 30 |
| ii. Les erreurs de représentativité | 30 |
| iii. Les erreurs de l'instant | 30 |
| B. Erreurs d'enquête | 30 |
| i. Les erreurs d'enquête | 30 |
| ii. Les erreurs d'échantillonnage | 30 |
| 2. Incertitudes actives ou variabilité naturelle | 30 |
| IV. Procédure à prendre en compte pour minimiser les incertitudes | 32 |

| | |
|--|----|
| 1. Choix de la valeur representative | 32 |
| A. Représentative des matériaux affectés par la future structure | 32 |
| B. Raisonnablement sécuritaire | 33 |
| C. Non pénalisante pour le projet | 33 |
| 2. Corrélations des paramètres géotechniques | 33 |
| 3. Variations spatiales des paramètres géotechniques | 34 |
| 4. Contrôle de qualité des échantillons de sols | 34 |
| A. Sur le terrain | 35 |
| i. l'échantillon de bruit de fond | 35 |
| ii. l'échantillon répété | 35 |
| B. En laboratoire | 36 |
| V. Elimination des données atypiques | 36 |
| Conclusion | 38 |

Chapitre III : Aperçu sur l'apport des méthodes statistique pour la caractérisation géotechnique des sols en Algérie

| | |
|--|----|
| Introduction | 39 |
| I. Exemple01 | 39 |
| II. Exemple 02 | 43 |
| 1. Analyse exploratoire des paramètres géotechniques | 44 |
| III. Exemple 03 | 47 |
| 1. Evaluation géostatistique du tassement | 49 |
| IV. Critiques des méthodes appliqués | 55 |
| 1. Exemple 1 et 2 | 55 |
| 2. Exemple 3 | 56 |
| Conclusion | 57 |
| Conclusion Générale..... | 58 |

Remerciement

Avant tout, nous remercions Dieu le tout puissant qui nous a aidé et donné la volonté et le courage d'entamer et de terminer ce mémoire.

Ce travail ne serait pas aussi riche et n'aurait pas pu avoir le jour sans l'aide et l'encadrement de Dr. Aoun Mounira , nous laremercions pour la qualité de sa encadrement exceptionnel, pour sa patience, sa rigueur, sa disponibilité, ses conseils éclairés et les encouragements durant nos préparation de ce mémoire.

Nos vifs remerciements vont aux membres de jury Pr. Baali Fathi d'avoir accepter de présider le jury de notre projet de fin d'études. Dr. Mouici Ridha qu'ils trouvent à travers ces expressions nos sincères remerciements pour l'honneur qui nous ont fait en acceptant d'examiner ce travail.

Nous adressons également notre profonde gratitude à Pr. FahdiChamesEddin , Mr. Bendar Yacine , Md , OuhamnaSoumia , qui nous ont apporté aide et soutien durant notre travail.

Notre sincères remerciements adressés à tous ceux qui de près ou de loin ont contribué à la réalisation de ce modeste travail.

Dédicace de Abid Souad

De dieu tout puissant, qui trace le chemin de ma vie, je dédie ce travail :

A la mémoire de mes chers parents, ma mère et mon père

Tous les mots ne sauraient exprimer a la gratitude, l'amour, le respect, la reconnaissance.

A mon frères , à mes sœurs .

A mon mari et mes enfant .

A tous mes amis.

En fin, a tous ceux qui m'aiment.

A vous.....

Dédicace de Sakher Iman

إلهي لا يطيب الليل إلا بشكرك ولا يطيب النهار إلا بطاعتك ولا تطيب اللحظات إلا بذكرك ولا تطيب الآخرة إلا بعفوك ولا تطيب الجنة إلا برويتك.
إلى سندي وملجأني وأمانني، إلى الذي أفنى عمره من أجل سعادتني، إلى ضلعي الثابت أبي رحمه الله وجعله ممن تفوح أطياب الجنان في قبره كما فاحت بالطيب سيرته.
يا من بها أكبر وعليها أستند... ياشمعة متقدة تنير ظلمة حياتي.. يامن بوجودها أكتسب قوة ومحبة لا حدود لها.. يا من علمتني معنى الحياة أمني أرجو المولى عز وجل أن يمدك الصحة والعافية

إلى زوجي منير
إلى جنيني الذي أحمله في أحشائي اللهم لاقني به سليما معافى
سندي وقوتي بعد الله... يا من أثروني على أنفسهم... يا رياحين حياتي
حمزة، منيرة، خديجة، نورة، نبيلة، أحلام، سلمى.

إلى رفيقات الدرب من شاركوني مر الحياة وحلوهن من كن سندا لي وقت الحاجة صديقاتي وأخواتي في الله
أهديكم جميعا ثمرة هذا العمل وفاء وتقديرا ومحبة ودعاء.

Liste des figure

| | |
|--|----|
| Figure 01 : Exemple de courbe représentant les valeurs propres en fonction du nombre de dimension (Carpentier, 2005)..... | 16 |
| Figure (2) : Les différentes formes de variation des paramètres de sol en fonction de la profondeur (Jaksa, 1995 in Bazi Karim, 2011)..... | 23 |
| Figure(03) : Variabilité spatiale des propriétés du sol (Phoon et Kulhawy, 1999 in Salloum, 2015). | 24 |
| Figure(04) :Types des incertitudes des propriétés du sol (Kulhawy, 1992 in Y. Houmadi, 2011)...... | 32 |
| figure (05) :Valeurs de la pression de gonflement expérimentales (Ps Expérimentale) vs. Les valeurs de la pression de gonflement prédites (Ps Théorique) (Berrah, 2008) | 42 |
| figure (06) :Corrélation du model proposé (représentation avec toute la base de donnée) (Barreh, 2008) | 42 |
| figure (07) : Nuages de points montrant les corrélations entre les différents paramètres physiques du sol étudié (M. Aoun, 2016) | 44 |
| figure (08) : Diagrammes en boîte des paramètres géotechniques (M. Aoun, 2016) | 45 |
| figure (09) :Nuages de points montrant les corrélations les paramètres physiques du sol étudié et la pression de gonflement libre (Aoun, 2016) | 46 |
| Figure (10) : Relation entre la pression de gonflement mesurée et estimée (M. Aoun, 2016)..... | 47 |

Liste des tableau

| | |
|--|----|
| Tableau 01 :Plusieurs dimensions de la variable statistique..... | 14 |
| Tableau (02) : Corrélations entre les paramètres géotechniques pour les cinq types des sols du Nord – Est Algerien (S. Khalfaoui, 2011) | 48 |
| Tableau (03) : Répartition des paramètres géotechnique dans les sols des principales formations géologiques (S. Khalfaoui, 2011) | 49 |
| Tableau (04) : Variographie du tassement des formations Socle, Formations d'âge Trias (S. Khalfaoui, 2011) | 51 |
| Tableau (05) : Variographie du tassement des formations d'âge Jurassique – Eocène, d'âge Oligocène | 52 |
| Tableau (06) : Variographie du tassement des formations d'âge | 53 |
| Tableau (07) : Résultats de krigeage ordinaire du tassement des types des sols | 54 |

Introduction Générale

Introduction générale

Du point de vue géologique et précisément lithologique, les sols et les roches, dans l'espace ne sont pas identiques, ils peuvent se différencier par plusieurs caractéristiques (la forme, les dimensions des particules ou des agrégats de particules, par l'existence de vides, l'existence de fissures, la présence de zones reflétant les contrastes de densité, ... etc.), de ce fait, les sols et les roches sont des milieux hétérogènes. L'hétérogénéité est due principalement aux processus de formation de ces sols et des roches qui ont subi des fluctuations dans le temps et dans l'espace, par conséquent, un impact sur les propriétés géotechniques des sols ou des roches est certainement clair d'un espace à un autre et d'une époque à une autre, provoquant ainsi une variation de celles-ci tant en profondeur qu'horizontalement (M. Aoun, 2016). A cet effet, la dispersion des propriétés géotechniques des sols et des roches est un problème que doit inévitablement traiter l'ingénieur géotechnicien dans la pratique courante géotechnique (Baguelin et Kovarik, 2000 in M. Aoun, 2016).

Le géologue ingénieur (le géotechnicien) se trouve, toujours, confronté à l'un des problèmes les plus difficiles en géotechnique, c'est que, pour la reconnaissance géotechnique des sols, il est impossible que, sur un même site, d'acquies tous les paramètres géotechniques du sol (paramètres physiques, mécaniques et chimiques) en tous points du site étudié, surtout pour les grands ouvrages, ce qui lui rend difficile de juger bien connu l'ensemble du massif de sol (M. Aoun, 2016). « La reconnaissance géotechnique se limite généralement au strict minimum, et l'on dispose alors, des valeurs de certains paramètres en certains et d'autres points en d'autres points » (M. Aoun, 2016). L'ingénieur géotechnicien doit tirer les meilleures informations de ces valeurs dispersées pour les utiliser dans les calculs nécessaires et établir des coupes géotechniques représentatives du site (M. Aoun, 2016).

En mécanique des sols, les méthodes de calcul reposent sur des hypothèses simplificatrices, qui ignorent généralement le caractère hétérogène des sols naturels. Le caractère hétérogène d'un point à un autre comme c'est déjà évoqué ci-dessus, qui influence sur des propriétés du sol concerné par ces calculs est pourtant une source d'incertitude sur le comportement prévu des ouvrages (J.P.Magnan, 1993 in M. Aoun, 2016). De ce fait, l'écart entre les résultats de calcul et les valeurs réelles n'est pas exclue (M. Aoun, 2016). Ainsi, dont le but est de prendre en compte l'influence de la variabilité des propriétés géotechniques des sols les spécialistes, cherchent donc à minimiser cet écart existant et ceci en appliquant des méthodes et des techniques diverses. Parmi ces techniques on peut citer les analyses statistiques et les probabilités (M. Aoun, 2016). Dans la littérature, plusieurs relations ont été proposées là où

chacune d'elles prend en compte des paramètres différents de l'autre (Dakshanamurty et Raman, 1973 ; Erguler et Ulusay, 2003 ; Erzin et Erol, 2007 ; Gray et Allbrook, 2002 ; Ranganatham et Satyanarayana, 1965 ; Didier et al., 1973 ; Komornik et David, 1969 ; Kariuki et Van der Meer, 2004 ; McCormack et Wilding, 1975 ; Seed et al., 1962 ; Skempton, 1984 ; Thomas et al., 2000 ; Yilmaz, 2006 ; Türköz et Tosun, 2011 ; Hashim et Suleman, 2012 ; ... et d'autres in M. Aoun, 2016).

Les applications des statistiques et probabilités dans le domaine de la géotechnique ont commencé au laboratoire central des ponts et chaussées (LCPC), là où les premières réflexions ont été entreprises sur certains types de sols (J. P. Magnan, 1996). Dans les années 1960, comme dans plusieurs centres de recherche, l'accent était mis en mécanique des sols, sur l'analyse et la recherche des relations entre certains paramètres géotechniques du sol, ce qui est connue actuellement sous l'étude des corrélations, dont le but de faciliter les études géotechniques pour le dimensionnement des ouvrages (Benzécri, 1976 ; J.P. Magnan, 1996). La connaissance de telles corrélations, qui prennent essentiellement la relation entre les propriétés physiques et mécaniques des sols, ont fait la base du projet lancé par H. Karst, ce projet constitue le peu de trace sur l'application des méthodes statistiques à cette époque (1960) (J.P. Magnan, 1996). De même, d'autres analyses statistiques variées ont été entreprises à cette époque, les résultats peuvent être trouvés dans les articles (Amar et Jézéquel, 1972; Amar et al., 1973; Pilot et al., 1970 in J.P. Magnan, 1996) et dans le rapport de recherche LPC de (Jezequel J-F., 1977 in J.P. Magnan, 1996).

L'effet de la variabilité naturelle des sols et sur le dimensionnement des ouvrages de géotechnique, faisait aussi l'objet de plusieurs recherches depuis 1970. D'après Magnan en 1996, ces recherches ont été appliquées sur des sites expérimentales tel que « [site expérimental de Cubzac-les-Ponts pour les sols argileux compressibles (Magnan et Baghery, 1982 ; Baghery et Magnan, 1983 ; Haghgou, 1983) ; site expérimental de Sallèdes pour les pentes argileuses (Abdul Baki *et al.*, 1993)] » (J.P. Magnan, 1996).

Les études antérieures ont donné l'alternative pratique d'appliquer les méthodes de dimensionnement probabiliste des ouvrages et même d'analyse statistique des données géotechniques d'un site donné, ce qui a conduit à plus de pessimisme sur l'utilité pratique de ce type de recherche (J.P. Magnan, 1996).

Les chercheurs se doivent de connaître les concepts entourant les méthodes d'analyses statistiques de base utilisées, pour mener des recherches scientifiques. Cela les aidera à mener

une étude bien conçue conduisant à des résultats valides et fiables. La statistique constitue un outil qui aide à appliquer les bonnes méthodes de collecte de données, à effectuer la bonne analyse et à présenter efficacement les résultats (Amar S et al., 1973). Une question se pose toujours : Pourquoi on a besoin d'une méthode statistique? Selon Amar et al. En 1973, la réponse est « On l'a besoin parce que les statistiques sont une approche scientifique pour analyser des données numériques afin de maximiser leur interprétation, leur compréhension et leur utilisation. C'est-à-dire les statistiques peuvent aider à transformer les données en informations. Les données interprétées, comprises est utiles au destinataire. Il est important que les chercheurs comprennent les concepts entourant les méthodes d'analyse statistique de base utilisées pour mener des recherches scientifiques. Cela nous aiderons à mener des études bien conçues qui produisent des résultats valides et fiables » (Amar et al., 1973).

Objectif du travail :

A travers notre recherche nous visons à donner un aperçu succinct sur :

- Les problèmes d'incertitudes en géotechniques;
- L'évaluation au mieux de la variabilité naturelle des paramètres géotechniques de sol -
Présenter certain exemple sur l'application des méthodes statistiques sur des sols donnés (classification des sols, modélisation, ... etc.).

Pour atteindre le but du travail, après avoir exposé l'introduction générale, nous avons opté le plan de travail qui suit :

- Différentes méthodes d'analyse statistique.
- La variabilité naturelle des paramètres géotechniques des sols, origine et source d'incertitude en géotechnique.
- Aperçu sur l'apport des méthodes statistique pour la caractérisation géotechnique des sols en Algérie

En fin une conclusion générale résumant l'essentiel de notre travail est nécessaire.

Chapitre I :

Différentes méthodes d'analyse statistique

Introduction :

Il est évident qu'il est impossible de déterminer les propriétés des sols en tous points, sur le site d'un projet et ceci pour une première raison purement économique lié au budget limité de la reconnaissance géotechnique d'un site concerné et une deuxième raison lié essentiellement à la stabilité du site et par conséquent à la sécurité de l'ouvrage (M. Aoun, 2016). Même si le budget le permet, il ne faut pas épuiser et remanier tous les sols pour le futur ouvrage (Magnan, 1982 in M. Aoun, 2016), à cet effet, le choix des propriétés des sols se fait sur la base de quelques résultats d'essais sur des échantillons prélevés pratiquement au hasard au niveau du site (M. Aoun, 2016). Les méthodes statistiques, constituent un outil performant pour la caractérisation géotechnique des sites, ainsi que la caractérisation de la variabilité naturelle des propriétés physiques et mécaniques des sols, ceci permettra de définir les hypothèses de calculs, et de rendre plus efficace la reconnaissance géotechnique, en jouant sur la position et le nombre des sondages (Magnan, 1982, M. Aoun, 2016). Dans le cas où le nombre des valeurs des essais, serait suffisant, on aboutira à des corrélations représentatives concernant les différentes propriétés d'un même type de sol (M. Aoun, 2016).

Dans ce qui suit de ce chapitre nous essayerons de résumer les méthodes les plus utilisées dans les domaines de la géotechnique.

I. Les statistiques et probabilités en mécanique des sols :

Comme c'est déjà évoqué en introduction générale, le développement des méthodes statistiques et probabilistes en mécanique des sols est donc dû :

✓ D'une part au besoin ressenti par les spécialistes de la géotechnique pour résoudre les problèmes posés par l'influence de la dispersion des caractéristiques des sols sur le calcul des ouvrages (Houmadi, Y., 2004) et ainsi pour minimiser les écarts entre les valeurs mesurées et les valeurs calculées

✓ D'autre part au désir des spécialistes des statistiques et de probabilités de trouver de nouvelles applications concrètes à leurs travaux théoriques (Houmadi, Y., 2004) et ainsi élaborer des modèles statistiques faciles à être généraliser et à utiliser (surtout en cas d'urgence).

Les méthodes statistiques sont utilisées dont le but de répondre aux objectifs suivants :

- Caractériser la variabilité naturelle des sols pour l'introduire dans les schémas de calcul classiques des fondations des ouvrages, Car, vu les conditions économiques et de stabilité du site, il est impossible de déterminer en tout point les propriétés du sol d'un projet donné, c'est pourquoi l'ingénieur doit choisir des valeurs représentatives de ces propriétés (moyennes par exemple). Le choix de ces valeurs conditionne fortement la confiance que l'on peut accorder aux calculs, le premier but est donc de contrôler la fiabilité des données et d'estimer la précision des résultats (Houmadi ; 2004).

- Rendre la reconnaissance géotechnique plus efficace, car elle ci est très limitée du point de vu budget, il est donc indispensable de l'optimiser en jouant sur certains facteurs (type, le nombre, position et même quelque fois la profondeur des sondages). Pour cela la recherche des corrélations existant entre les différentes propriétés des sols est très utile. Cette démarche est spécialement intéressante du faite que les méthodes de détermination de ces propriétés sont plus ou moins rapides que peu d'essais longs et complexes (Houmadi ; 2004).

Ces études statistiques présentant donc un intérêt pratique certain, mais elles ne doivent pas constituer une fin en soi (Magnan, J.P. ; Pouget, P. ; 1993), leur emploi doit avoir comme but de mieux définir les hypothèses de calcul déterministes (Magnan, J.P. ; Pouget, P. ; 1993). Des méthodes de calcul probabiliste ont également été développées. Ces méthodes, en tenant compte de l'influence de la variabilité des paramètres, permettent de présenter les résultats des calculs sous forme d'une valeur moyenne et d'une incertitude ou mieux encore d'une distribution de probabilité des déplacements et d'une probabilité de rupture (Magnan, 1993).

Les méthodes statistiques et probabilistes sont actuellement devenue très applicable dans le domaine de géotechnique, mais il reste encore des techniques d'analyse moins inexploitées ou en cours d'étude. Cependant une liste établie par Magnan en 1983, conclue les principaux secteurs de l'activité du géotechnicien pouvant bénéficier de l'apport de ces méthodes statistiques (Magnan en 1983):

1. Au stade de la reconnaissance géotechnique :

- Choix du nombre et de l'implantation des sondages ;
- Choix des types de sondage et d'essais (utilisation de corrélations) ;
- Mise en forme des résultats et préparation de coupes géotechniques pour les calculs.

2. Au stade de calcul des ouvrages :

- Calcul de la stabilité de l'ouvrage en termes de probabilité de rupture ;
- Calcul de la distribution de la probabilité (ou de la valeur moyenne de l'incertitude) pour les déformations des sols de fondations au cours du temps.
- Détection des points faibles dans les ouvrages complexes (zones de plus grand risque dans un barrage, ouvrage le plus critique dans un ensemble d'ouvrages de soutènement en zone instable).

3. Au stade de contrôle sur l'ouvrage réalisé :

- Détermination des zones où l'incertitude est maximale et où il faut placer l'instrumentation ;
- Contrôle de la qualité des travaux, etc.

II. Les différentes méthodes d'analyses statistiques utilisées en mécanique des sols :

Pour étudier un sol, il faut passer par la collecte de données à travers une reconnaissance géotechnique, ces données sont des caractéristiques géotechniques (paramètres physiques, mécaniques, chimiques et même minéralogiques) qui sont exprimés par valeurs numériques. La statistique permet de traduire ces valeurs numériques en informations utiles pour la réalisation du projet investi. Les méthodes statistiques peuvent généralement être structurées comme suit:

- La statistique descriptive d'une population donnée (valeurs d'un paramètre donnée du sol par exemple), qui est un ensemble des méthodes permettant d'analyser les données à partir de paramètres et de graphes (histogramme, nuage de point..., etc.). Cette statistique descriptive est basée sur les calculs de : la moyenne arithmétique, l'écart types, la variance, la distribution autour de la médiane, ... etc.
- Les modèles statistiques qui permettent d'ajuster les résultats recueillis sur un échantillon à des lois de probabilité afin de faire des prévisions et des interpolations sur la population. Cette statistique est basée sur la recherche d'un échantillon qui

représente les données géotechniques. C'est-à-dire, il représente le mieux possible la diversité de la population entière.

1. Statistique descriptive :

A. Généralités:

L'ensemble d'individus (paramètre du sol dans le cas de la géotechnique) sur lequel on effectue une analyse statistique est dit population. Le nombre d'individus est l'effectif de la population. L'échantillon est l'ensemble d'individus prélevés dans une population déterminée pour l'étude demandée, donc l'échantillon, l'individu et la population diffèrent selon le domaine et selon l'objectif.

La caractéristique étudiée est dite caractère ou variable statistique. On distingue les caractères qualitatifs et les caractères quantitatifs qui peuvent être discrets ou continus (Claude Bouchu , 1969). Les informations recueillies doivent être résumés dans des tableaux statistiques.

Pour un caractère discret, à chaque valeur observée x_i est affecté un effectif n_i ou une fréquence f_i qui désignent respectivement le nombre ou le pourcentage d'apparition de la valeur observée.

Pour un caractère continu, l'effectif n_i et la fréquence f_i sont associés à des classes d'intervalles, le tableau des données recueillies peut être traduit en graphes simple et facile à lire (Claude Bouchu , 1969).

On opte généralement pour la représentation du caractère discret le diagramme en bâtons pour représenter les effectifs ou les fréquences associées aux valeurs observées. Pour le caractère continu, on opte l'histogramme qui représente mieux, le nombre d'effectif pour des intervalles de paramètres observés (Claude Bouchu , 1969).

A partir d'un histogramme on peut tracer un diagramme en bâton, où à chaque centre de classe on affecte la valeur de l'effectif associé (Claude Bouchu , 1969). Le diagramme intégral correspond à une représentation des effectifs ou fréquences cumulés soit par des courbes en escaliers ou des courbes cumulatives, cette dernière est la fonction qui représente les fréquences cumulées en fonction du paramètre étudié (Digabel , 2017).

En plus des représentations graphiques, l'analyse statistique peut être complétée par des paramètres statistiques :

- Les paramètres de position rendent compte de l'ordre de grandeur de l'ensemble des observations, tels que: la moyenne appelé aussi «espérance mathématique », la médiane et le mode. Ces paramètres permettent aussi de localiser les zones des fréquences maximums (Immediato, 2010).
- Les paramètres de dispersion qui expriment les écarts entre les valeurs observées, tels que : la variance, l'écart type appelé aussi moyenne quadratique et les moments statistiques. L'histogramme, ou le diagramme, des fréquences donnent une idée sur la dispersion des données autour de la moyenne, cette dispersion peu aussi être représenté à l'aide de la boîte à moustache (boxplot)(Immediato, 2010; M. Aoun, 2016).
- Les paramètres de forme tels que les coefficients de variation (C_v), les coefficients d'asymétrie « skewness » et d'aplatissement « kurtosis » qui donnent une idée sur la régularité des observations ainsi que sur les zones de forte ou faible fréquence (Immediato , 2010 ; M. Aoun, 2016).

B. Lois de distribution statistique :

Une loi de probabilité est donnée par une fonction $f(x)$ de densité de probabilité (fdp), et une fonction de répartition $F(t)$ (Immediato, H., 2010).

La fonction f doit être positive ou nulle et d'intégral égale à 1

$$f(x) \geq 0 \text{ et} \\ + \\ \int_{-\infty}^{\infty} f(x) dx = 1$$

La probabilité de non dépassement est données par :

$$F(t) = \text{prob}(X \leq t) = \int_{-\infty}^t f(x) dx$$

Parmi les lois de probabilité on distingue celles associées aux caractères discrets tels que :

- Loi uniforme,
- Loi de Bernoulli,

- Loi binomial,
- Loi binomial négative,
- Loi de poisson,
- Loi géométrique,

Les caractères continus suivent les lois suivantes :

- Loi uniforme,
- Loi normale ou loi de Laplace-Gauss
- Loi normale réduite,

Les lois déduites de la loi normale sont (Immediato H., 2010) :

- Loi du χ^2 de Pearson
- Loi de Student
- Loi de Fisher-Snédecour

Selon Abdul Baki et al. (1993), les lois les plus utilisées en mécanique des sols sont la loi normale et la loi béta. On les applique aussi au logarithme et inverse du paramètre étudié (Abdul Baki et al., 1993).

i. Loi normale :

Elle est dite aussi loi de Laplace-Gauss. Elle est définie par deux paramètres m et σ qui désignent, l'espérance mathématique (moyenne) et l'écart type. La Fdp est donnée par (Immediato, H., 2010) :

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}}$$

La fonction est symétrique et se présente sous forme de cloche ayant pour coefficient d'asymétrie et d'aplatissement $\beta_1=0$ et $\beta_2=3$. C'est une loi de référence dite loi centrale.

ii. Loi Log-Normale :

Une variable aléatoire X suit une loi log-normale quand son logarithme suit une loi normale. C'est à dire que : $Y = \text{Ln } X$ suit une loi Normale. La fdp s'écrit (Immediato, H., 2010) :

$$f(x) = \frac{1}{x} \cdot \frac{1}{\beta\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln(x)-\alpha}{\beta}\right)^2}$$

α et β sont respectivement l'espérance et l'écart type de la variable $Y = \text{Ln}(X)$.

iii. Loi bêta :

C'est une loi pour les caractères continus, bornée par deux paramètres de forme notés α et β , et définies sur $[0,1]$. C'est une loi avec deux paramètres seulement.

Sa fonction de densité $f(x; \alpha; \beta)$ de probabilité a plusieurs formes pour des valeurs variables de α et β (Immediato, H., 2010) :

$$\alpha = m_x \left(\frac{m_x(1 - m_x)}{V} - 1 \right)$$

$$\beta = (1 - m_x) \left(\frac{m_x(1 - m_x)}{V} - 1 \right)$$

$$f(x; \alpha; \beta) = \frac{x^{\alpha-1}(1-x)^{\beta-1}}{\int_0^1 u^{\alpha-1}(1-u)^{\beta-1}} \text{ avec } x \in (0,1)$$

$$\text{Sinon } f(x; \alpha; \beta) = \frac{1}{B(\alpha, \beta)} x^{\alpha-1} (1-x)^{\beta-1}$$

$$f(x; \alpha; \beta) = \frac{1}{B(\alpha, \beta)} x^{\alpha-1} (1-x)^{\beta-1}$$

Où Γ est la fonction gamma définie par :

$$\Gamma(\alpha) = \int_0^{+\infty} e^{-t} \cdot t^{\alpha-1}$$

$[0,1]$ (x) : est la fonction caractéristique de $[0,1]$,

B : est la fonction béta constante de normalisation permettant à la densité de s'intégrer à l'unité,

Dans cette loi espérance mathématique :

$$E(x) = \frac{\alpha}{\alpha + \beta}$$

Et à la variation : $V(x) = \frac{\alpha\beta}{x}$

C. Tests statistiques :

Lors des tests statistiques paramétriques, nous nous référons aux mêmes lois de distribution pour trouver la probabilité que les données soient conformes à une certaine hypothèse.

Les tests statistiques sont faits pour assurer une comparaison entre les observations à partir d'une étude statistique et aux valeurs, auxquelles on peut s'attendre d'une hypothèse quelconque, Il existe plusieurs tests entre autre :

i. Test d'adéquation de Kolmogorov:

Il est recommandé de construire une statistique de test basée sur la distance entre les distances estimation de la fonction de distribution F et de la fonction de distribution de la variable X (Megnouni, 2013) . En supposant que toute régularité obtenue à partir des observations est suivie, nous posons les hypothèses de test suivantes :

H0 : X suit la loi F

H1 : X suit une autre loi.

Kolmogorov propose la statistique de teste suivante

$$D_n = \sup |f_n(x) - f(x)|$$

ii. Test d'adéquation du chi 2 : loi discrete

La loi de distribution se rapproche de la distribution du 2 à (k-r-1) degrés de liberté, quand la loi théorique est valide (Monbet , 2009) On utilise une statistique de test du chi2 donnée par :

$$T = \sum_{K=1}^K \frac{(n_i - e_i)^2}{e_i}$$

K: le nombre de classe dans les quelle on a regroupé les n valeurs

n_i : Nombre d'observation qui tombent dans la ième casse

e_i : Nombre théorique des éléments de la classe i

r: Nombre de paramètres qu'il a fallu estimer pour définir la loi tester

«On suppose que la loi de distribution théorique, est la même loi de distribution réelle de la population. Le teste par rapport à $\chi \alpha$ représente le α qui est une valeur particulière de T, ou niveau de signification qui se déroule de la façon suivante:

✓ Diviser l'étendue de l'échantillon en K classe, la classe est limitée par les valeurs de variable, et on compte le nombre des observations qui tombent en chaque classe.

✓ Calculer les effectifs e_i des classes pour la loi testée

$$e_i = n. [g(x) - g(x_{i-1})]$$

$g(x)$, est une fonction de répartition

- Calculer T

- Chercher dans une table des valeurs de $\chi \alpha$ correspondant au nombre de degré de qui est liée à $\chi \alpha$ liberté (k-r), puis fixer une valeur du niveau de signification α , et dire si la loi testée est valide ($T \leq \chi \alpha$) » (Megnounif , 2013).

III. Statistique pour caractère bi-varié :

Les paramètres étudiés peuvent être mixtes. «Dans le cas de caractère bi-varié, la variable statistique à deux dimensions est une variable composée de deux variables statistiques à une

dimension, dont l'une est explicative et l'autre est expliquée et qui se présente par un tableau à double entrée appelé tableau de contingence» (Monbet ; 2009) .

Lorsqu'on a deux grandeurs statistiques X et Y, on a pour objectif :

- D'analyser la liaison et voir s'il existe une relation entre X et Y. l'analyse se fait en général par un nuage de n points définie par $\{(x_i, y_i); 1 \leq i \leq n\}$, cette analyse graphique permet de comprendre les différentes caractéristiques énumérées ci- dessous:
- Situer les proximités entre les individus,
- Etudier la forme globale des points,
- Voir, s'il existe une forme de liaison ou de régularité,
- Détecter visuellement les points qui s'écartent des autres.
- Définir la forme de la relation entre X et Y. La relation peut être Linéaire positive, linéaire négative comme on peut avoir des liaisons monotones non- linéaire, liaisons non- linéaires et non-monotones ou absence de liaison.
- Quantifier l'intensité de la liaison.

IV. Droite de corrélation :

Lorsqu'on a un nuage de point qui présente une tendance linéaire, on cherche la meilleure droite qui passe le plus proche possible des points expérimentaux. La droite est représentée de telle manière à minimiser les erreurs e_i qui présentent les distances entre les points et la droite, cette dernière est nommée droite de corrélation ou de régression et qui a pour équation:

$$Y = aX + b$$

1. Critère des moindres carrés :

La droite est tracée en déterminant les coefficients a et b, de telle sorte que $\sum e_i \rightarrow 0$

avec :

$$e_i = y_i - (ax_i - b)$$

Le principe de cette méthode (Megnounif, 2013), est que la somme des carrés des distances e_i soit minimale. Les paramètres a et b du modèle doivent donc vérifier le minimum de la fonction :

$$\varphi(a, b) = \left(\sum e_i \right)^2 = (y_i - (ax_i - b))^2$$

2. Qualité de l'ajustement linéaire entre les caractères X et Y

Le coefficient R ne mesure que le caractère linéaire d'une liaison. Son usage doit être réservé à des nuages où les points répartis suivant une tendance linéaire. La qualité de la corrélation peut être mesurée par un coefficient de corrélation R .

$$R = \frac{\sum_{i=1;n} (x_i - \bar{X})(y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1;n} (x_i - \bar{X})^2 \sum_{i=1;n} (y_i - \bar{Y})^2}} = \frac{Cov(X, Y)}{\sigma_X \sigma_Y}$$

V. Statistique pour caractère multi-varié :

«Les paramètres étudiés peuvent être mixtes. La variable statistique à plusieurs dimensions est une variable composée de nombreuses variables statistiques à une dimension, dont l'une est expliquée et les autres sont explicatives.» (Helbling, 2018)

Tableau 01 : Plusieurs dimensions de la variable statistique.

| | | | | | | |
|----------------|----------------|----------------|----------------|------|------|----------------|
| U | V | W | X | | | M |
| U ₁ | V ₁ | W ₁ | X ₁ | ... | ... | M ₁ |
| U ₂ | V ₂ | W ₂ | X ₂ | ... | ... | M ₂ |
| . | . | . | . | | | . |
| . | . | . | . | | | . |
| U _n | V _n | W _n | X _n | ... | | M _n |

On suppose que la fonction $f(U, V, W, \dots)$ soit la meilleure courbe qui se rapproche le maximum du nuage de point. Cette tendance (Cibois, P ; 2006) est formée par la variable M qui est expliquée par l'ensemble des autres variables. Avec:

$$f(U, V, W, \dots) = m_i = a \cdot u_i + b \cdot v_i + c \cdot w_i + \dots \dots (\text{Cibois, P ; 2006}) \quad i \in [1, N]$$

VI. Analyse factorielle des données :

L'analyse factorielle est l'une des méthodes de la statistique multi variée, elle est utilisée pour décrire la variabilité entre des valeurs observées, à l'aide de variables discrètes. Cette méthode est utilisée en cas où l'on dispose de grandes quantités de données.

Les résultats de l'analyse factorielle sont proches de l'analyse en composantes principales (ACP). Néanmoins, les matrices de variance-covariance analysées des deux méthodes sont différentes (Jérôme Pagès ; 2013).

D'après B. Escofier (1979), l'analyse factorielle désigne souvent de façon générale les méthodes d'analyse des données, dont fait partie l'ACP (analyse en composante principale) et l'AFC (l'analyse factorielle des correspondances (B. Escofier, 1979).

VII. Analyse factorielle des correspondances (AFC) :

L'AFC est une analyse en composante principale (ACP). Elle a pour but de lire l'information contenue dans un repère multidimensionnel en diminuant la dimension de l'espace mais tout en conservant un maximum d'information englobé dans l'espace de départ.

L'analyse factorielle est une technique utilisée pour exploiter des observations à partir d'un tableau de contingence : elle permet de donner une représentation graphique qui permet de voir les rapprochements et les oppositions entre les caractéristiques des individus (Cibois, 2006).

La méthode donne comme résultats:

- ✓ Des images des nuages d'individus-lignes ou colonnes, de manière que les distances entre images soient des distances euclidiennes et non plus des distances calculées selon la métrique du 2,

- ✓ Recherche les directions de plus grande dispersion dans ces nuages de points images.

La matrice dont on recherche les valeurs et vecteurs propres est un concept mathématique difficile, qui ne possède pas de signification immédiatement intuitive. De ce fait, on calcule des produits scalaires entre lignes (ou entre colonnes) de cette matrice (Carpentier, 2005).

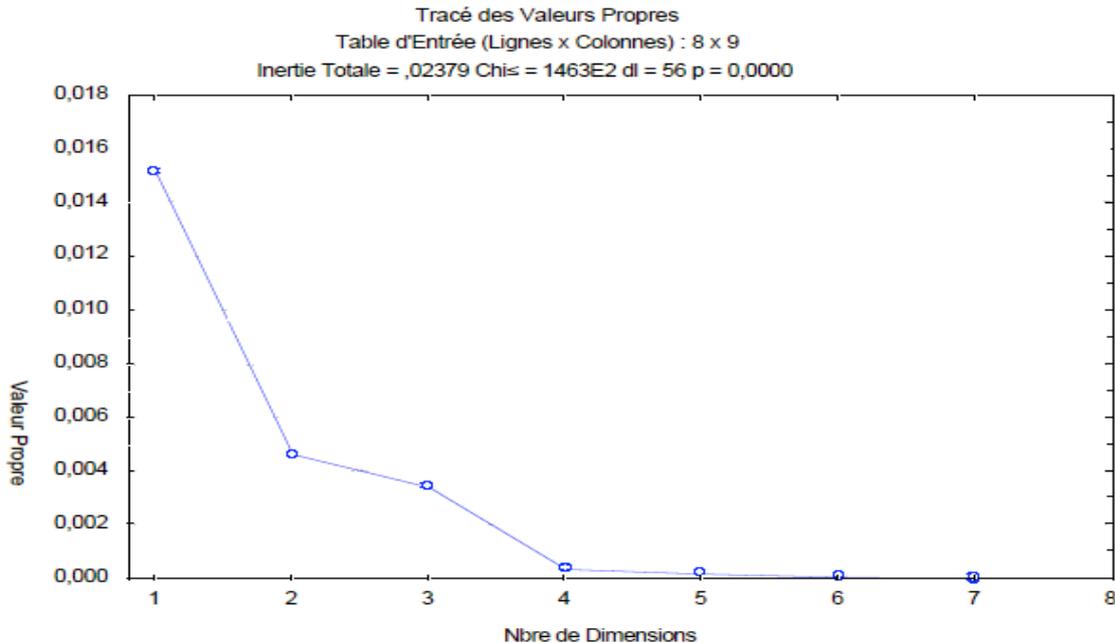


Figure (01) : Exemple de courbe représentant les valeurs propres en fonction du nombre de dimension (Carpentier, 2005).

VIII. Variations spatiales

Une caractéristique mesurée en un point, peut être considérée une variable aléatoire en ce point. Il en est de même pour tous les points d'un échantillon donné. On aura alors une infinité de variables aléatoire représentant simultanément l'échantillon (Immediato, H., 2010).

Il y a deux étapes principales dans une étude lors de variation spatiale :

- Le variogramme a pour concept que deux observations situées l'une près de l'autre devraient, en moyenne, se ressembler plus que deux observations éloignées. Il est basé sur une fonction mathématique, utilisée pour l'identification des caractéristiques des variables aléatoires (Chauvet, 1999).

b) Le krigeage est une méthode qui utilise les valeurs connues des caractéristiques des variables aléatoire pour une estimation optimale aux points non mesurés (Chauvet, 1999).

Conclusion :

L'analyse statistique est un puissant outil d'analyse qui est utile lorsque nous nous possédons unegrandes quantités des données quantitatives à traiter et à interpréter. L'émergence au fil des années des logiciels de plus en plus puissants et simples d'utilisation rend ce type d'analyse des données accessible aujourd'hui dans divers domaines. les méthodes statistiques fournissent un outil essentiel, permettant de mettre en relation des paramètres physiques , mécaniques et chimiques du sol aboutir à des corrélation entre les paramètres, puis de tracer des formules généralisables à partir des sols pouvant avoir des propriétés identiques du point de vue pétrographique ou géotechnique. Décrire la variation naturelle des propriétés du sol , en augmentant l'efficacité de la reconnaissance géotechnique.

Chapitre II :

La variabilité naturelle des paramètres géotechniques des sols, origine et source d'incertitude en géotechnique

Introduction

La géotechnique est l'une des spécialités d'engineering possédant une caractéristique pénible de conséquences car l'ingénieur géotechnicien responsable de l'aménagement d'un site donné, de la conception d'un ouvrage bien défini ou de la remédiassions d'un endommagement quelconque rencontré pour un ouvrage, ... etc., doit accommoder des terrains constituant le site et en plus, il doit les identifier et les caractériser avant d'entreprendre la conception du projet (nouvelle construction, aménagement, adaptation de confortation, ... etc.) (J. P. Magnan, 2000).

L'identification des formations (sols et roches) se fait de manière ponctuelle à l'aide des sondages, des essais et de mesures géophysiques sur des surfaces ou des volumes qui doivent, en fonction du budget de la reconnaissance, être bien limités. Les sols naturels présentent des variations de leurs propriétés d'un point à l'autre due certainement à la variation de leur composition minéralogique et au processus de leur formation (contraintes, sédimentation, altération, ... etc.) (Mahdavi ,1985), pour ce fait, la compréhension d'un site reste relative et les données de calcul sont incertaines car, les variations autour des valeurs mesurées dans les essais créent des incertitudes sur l'estimation des valeurs des paramètres de calcul et par conséquent sur la prévision du comportement des ouvrages (Mahdavi ,1985).

De cette variabilité naturel des sols tant dans l'espace que dans le temps, est née le souci des spécialistes de la géotechnique, ce souci leur à poussé à chercher comment limiter cette incertitude. Ils ont donc pensé à l'utilisation de la description statistique des sols et des roches et à prendre en compte les calculs de probabilités. De ce fait, les modèles statistiques cherchent par le biais des corrélations de minimiser les écarts entre les valeurs mesurées et ceux calculées. La méthode d'analyse des variations spatiales est souvent fonction du schéma de calcul de l'ouvrage étudié. Selon la complexité du site qui est difficile à déterminer (DUBOST J., 2009 ; Mahdavi ,1985), ces modèles peuvent être très représentatifs ou très incertains (J.P Magnan, 2000). Malgré ça, ces modèles ont connue un développement et sont devenue de plus en plus applicable et généralisé surtout pour les sols identiques.

Ce chapitre a pour but de présenter lest différents types de variabilité naturelle des sols et de leurs paramètres géotechniques et leur relation avec la géologie, la tectonique, et l'altération ... ertc., et aussi présenter l'origine de la variabilité, les causes et les conséquences.

I. Variabilité des sols : origine, facteurs et différentes formes :

La reconnaissance de la variabilité spatiale des paramètres géotechnique se pose aujourd'hui de manière amplifiée en étapes de reconnaissance d'un site, surtout vu l'extension des surfaces urbaines. Dans la littérature et en matière de mécanique des sols, un nombre considérable de chercheurs ont abordé le problème de l'homogénéité des sols en particulier l'homogénéité des paramètres géotechniques nécessaires pour le calcul et pour le dimensionnement des ouvrages de génie civil (Burroughs, 1993 in Salloum, 2015 ; J.P. Magnan, 1996 ; J.P. Magnan, 2000 ; A. Nour, 2004 ; Hyunki Kim, 2005; Y. Houmadi, 2011 ; ... etc.). En général, la majorité des résultats des recherches ont conclu que l'hypothèse d'homogénéité peut être admise dans un cas sans l'autre par exemple il peut être admis en cas d'un problème de tassement d'ensemble, mais il est rejetée pour une analyse de stabilité mécanique sensible à des variations centimétriques des propriétés des matériaux (Deplagne et al, 1993). La variabilité des paramètres des sols est fonction de plusieurs facteurs dont elle retrouve l'origine tel que, l'hétérogénéité, la diversité, l'échantillonnage, la réalisation des essais in situ et au laboratoire, ... etc. Du point de vue géotechnique et calcul de la mécanique des sols, de très importantes questions se posent pour chacun de ces facteurs.

1. Hétérogénéité du sol :

Les sols et roches présentent fréquemment des hétérogénéités spatiales qui proviennent des processus d'érosion et de sédimentation (Einsele, 1991 in N. Salloum, 2015). Ces hétérogénéités sont remarquées tant à l'échelle microscopique qu'à l'échelle macroscopique (N. Salloum, 2015), à l'échelle microscopique, les sols sont multiphase (constitué des minéraux, de l'eau, du gaz et d'autres fluides non miscibles, des ions et des micro-organismes), à l'échelle macroscopique, l'hétérogénéité des sols et des roches indique la variation spatiale des processus géologiques intervenant dans leur formation (sédimentation physique et/ou chimique, la désagrégation, la dessiccation, la consolidation, la diagenèse, la cimentation, le lessivage, les déformations tectoniques, ... etc.) (Kim, 2005 in N. Salloum, 2015). Malgré que les études de géotechniques et génie civil, sont généralement consacrées aux matériaux constituant les couches superficielles de l'écorce terrestre mais leurs propriétés dépendent de la position et de la profondeur (Magnan, 1993 ; C. Kahina et H. Litician, 2020).

On peut se poser la question suivante, de ce fait, le problème de l'anisotropie des propriétés d'une formation donnée se pose, Bien que les formules de calcul en mécanique des sols se reposent sur des hypothèses simplificatrices qui néglige cette caractéristique (anisotropie) (Aoun, 2016).

2. Diversité :

La diversité est l'une des caractéristiques marquantes en géologie, car on trouve aussi bien des massifs très résistants comme les roches granitiques, que des bancs fissurés à très fissurés tel que les calcaires, des couches solubles de gypse ou de sels, des cailloux et graviers de différentes forme, des sables fins, des argiles, des limons ou des tourbes. Certains matériaux sont perméables, d'autres sont semi perméables à imperméables non. Certains matériaux sont fissurés, d'autres constituent des massifs homogènes. Des formations sont déposés de manière stratifiée, d'autres sont massif, ... etc. (Megnounif Imène, 2013). Toute cette diversité a des conséquences sur la variabilité spatiale des paramètres géotechniques des sols en un site donné.

De même, ici la question qui se pose toujours c'est l'homogénéité des propriétés géotechniques en tous points.

3. Variabilité dans l'espace :

Comme c'est déjà évoqué ci-dessus, cette variabilité spatiale des sols et de leurs propriétés géotechniques, résulte des conditions de formation des matériaux de l'écorce terrestre et de leur évolution sous l'effet de différents facteurs (volcanisme, orogénèse désagrégation, altération, transport gravitaire, transport glaciaire, transport fluvial ou éolien, milieux de sédimentation en eau douce ou en eau salée..., etc.) (Megnounif Imène, 2013). Il en résulte de tous ces processus différents, des formations ayant des propriétés variables, même au sein de la même couche considérée comme homogène, les paramètres géotechniques peuvent être différents d'un point à un autre. On se trouve toujours en présence de cette question : les sols d'un site ont-ils des propriétés variables d'un point à un autre ? et à quelle intervalle tout au tour du point de mesure, on peut les considérer comme homogènes ?

4. Ignorance :

Le caractère ponctuel de la reconnaissance géotechnique est à l'origine de cette ignorance, car à cause des contraintes économiques et de stabilité, on ne peut jamais connaître en tout point d'un massif de sols ou de roches la nature et les propriétés physiques, mécaniques, chimiques et même minéralogique du matériau concerné par la reconnaissance. A cet effet, le géotechnicien responsable de la reconnaissance se trouve confronté à un déficit qu'il doit réussir : comment à partir d'un nombre limité de point d'échantillonnage, peut-il avoir le maximum d'informations pour se rapprocher de la réalité ?

5. L'échantillonnage :

Au sein d'un site donné, les mesures sont effectuées sur des carottes prélevées à l'intérieur du massif à étudier ou sur des affleurements et ne concernent dans le meilleur des cas qu'une fraction très faible du volume du massif (Megnounif Imène, 2013). Pour ce fait, un tel échantillonnage reste insuffisant et ne reflète pas la totalité de l'état du site étudié (Magnan, 1993), sachant que l'objectif final pour le géotechnicien et le mécanicien des sols, est le dimensionnement de l'ouvrage. Par ses conséquences sur les propriétés physiques et mécaniques utilisées dans les calculs et même sur les modèles de calcul eux-mêmes, la variabilité naturelle présente donc un intérêt considérable. Encore ici la question qui se pose est : un échantillon pris ponctuellement du site représente-t-il la totalité de ce dernier ? Et une mesure d'un paramètre au laboratoire ou in situ est-elle représentative du sol constituant le site étudié ? Si c'est le cas, comment peut-on en tenir compte de tout ça dans les calculs (Magnan, 1993 ; Megnounif Imène, 2013).

II. Évaluation de la variabilité spatiale des sols :

En tout état de cause, connaissant cette variabilité naturelle des sols ainsi par rapport au nombre limité des moyens de reconnaissance ainsi que d'essais effectués, on peut imaginer la part de subjectivité qui entre dans la détermination des valeurs représentatives des caractéristiques physiques et mécaniques des sols (Megnounif Imène, 2013). « En effet, le choix de ces valeurs relève en grande partie du savoir-faire de l'ingénieur praticien et, selon son expérience, il présentera le résultat de son calcul comme une valeur précise et fiable ou

comme une valeur prévisionnelle.» (Megnounif Imène, 2013 ; Magnan, 1993). De plus, les modèles utilisés dans les calculs du comportement des sols supports des ouvrages ne sont pas très satisfaisants, surtout s'ils sont appliqués à des massifs de dimensions réelles et qu'on compare leurs prévisions aux résultats des mesures réalisées sur un site réel ce qui oblige alors les spécialistes de chercher de meilleures valeurs des paramètres (Megnounif Imène, 2013). C'est pourquoi en mécanique des sols, une nouvelle approche s'imposait pour tenter de résoudre ces problèmes d'hétérogénéité des sols, les méthodes statistiques et probabilistes sont donc venues compléter les méthodes déterministes classiques. L'idée principale est de penser raisonnablement que l'amélioration de la description des variations naturelles des propriétés des sols plus l'amélioration des méthodes de calcul probabiliste ainsi que l'amélioration de la description des mécanismes de rupture doivent conduire à des méthodes de calcul utilisables pour les projets (Magnan et al. 1994).

La distribution dans l'espace des valeurs des propriétés physiques et mécaniques des sols dans le plan ou en profondeur constituent donc une donnée extrêmement importante pour le dimensionnement des ouvrages (Baziz Karim, 2011). La figure ci-dessous montre les trois cas rencontrés en pratique pour la variation des paramètres de sol en fonction de la profondeur (Jaksa, 1995 in Baziz Karim, 2011) :

- Le premier cas correspond à une distribution des paramètres de sol autour d'une moyenne constante.
- Le deuxième cas correspond à des paramètres de sol dont la moyenne dépend de la profondeur Z .
- Le troisième cas correspond à des paramètres de sol dont la variance dépend aussi de la profondeur.

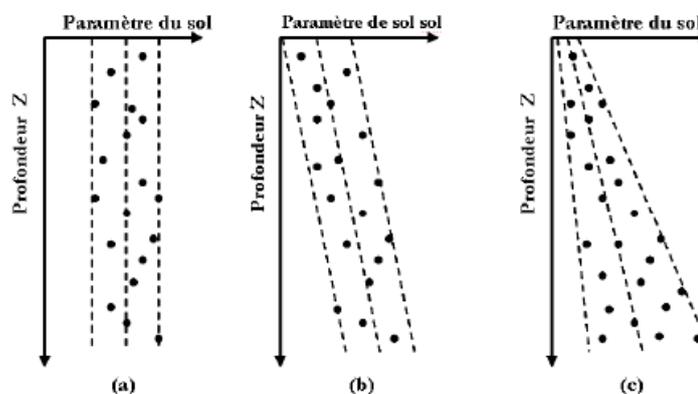


Figure (02) : Les différentes formes de variation des paramètres de sol en fonction de la profondeur (Jaksa, 1995 in Bazi Karim, 2011).

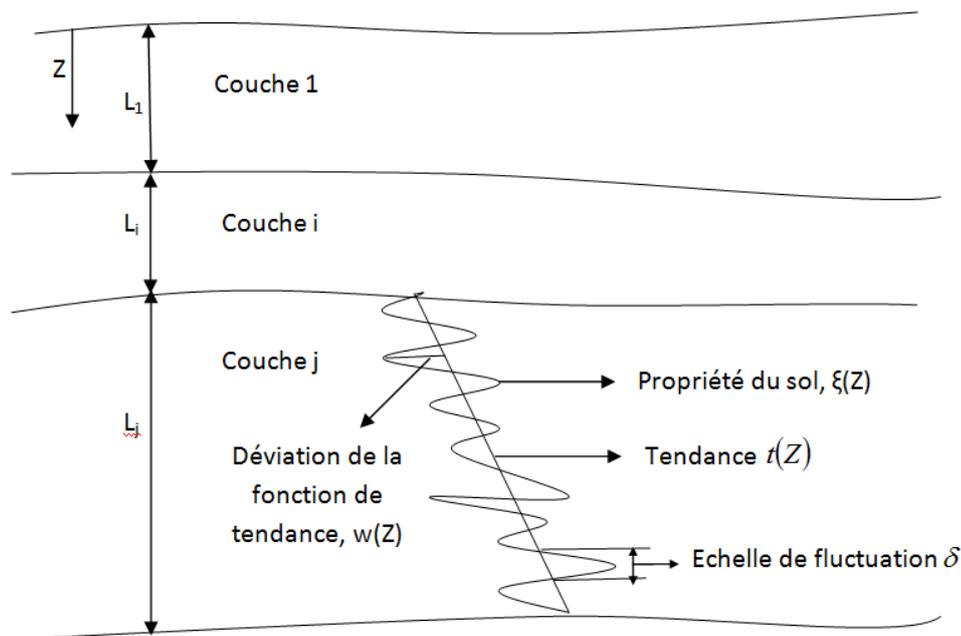
D'après Salloum (2015), au sein d'une couche de sol la variabilité d'une propriété de sol suivant une direction donnée (verticale par exemple) peut être représentée comme suit (Phoon etKulhawy 1999a in N. Salloum, 2015):

$$\xi(Z) = t(Z) + w(Z)$$

Où

- $\xi(Z)$: est la valeur de la propriété du sol,
- $t(Z)$: est une fonction de tendance déterministe,
- $w(Z)$: est la fonction de fluctuation.

La figure suivante, montre la variation spatiale des propriétés du sol et fluctuation au tour de la fonction de tendance déterministe (Salloum, 2015)



Figure(03) : Variabilité spatiale des propriétés du sol (Phoon et Kulhawy, 1999 in Salloum, 2015).

La fonction de tendance $t(Z)$ est une fonction déterministe qui peut être linéaire, parabolique, exponentielle, etc. elle prend en compte l'évolution moyenne de la propriété considérée d'une couche de sol avec la profondeur et donne la valeur moyenne de la propriété aléatoire du sol en un point x_i . Vu que la contrainte initiale effective et le degré de consolidation des sols

augmentent en profondeur, la moyenne des propriétés est supposée croissante avec la profondeur au sein d'une couche géologique (Phoon et Kulhawy, 1999a in Salloum, 2015).

Pour mieux comprendre la relation entre ces trois fonction, il est intéressant de montré que la fonction de fluctuation $w(Z)$ représente la variation aléatoire de la propriété considérée autour de la fonction de tendance $t(Z)$. Quand à l'échelle de fluctuation, c'est une distance qui montre la corrélation entre deux valeurs de la même propriété mesurées à deux endroits différents, hors cette échelle, les valeurs de la même propriété du sol sont considérées comme décorrélées. Si cette distance est grande, ça indique une lente variation de la propriété du sol le long de la fonction de tendance, au contraire, si elle est petite elle signifie un changement de la propriété entre deux positions voisines et ceci indique. Donc c'est à la base de cette échelle (distance) qu'on peut estimer si on est en présence de grande variabilité spatiale de la propriété ou bien le contraire.

La caractérisation statistique des données géotechniques ainsi que l'estimation des incertitudes reliées à ces propriétés différentes techniques sont utilisées (Salloum, 2015), on cite comme bref exemple les méthodes les plus utilisées suivante :

- Les méthodes statistiques traditionnelles qui prennent comme variable aléatoire la propriété de sol elle-même. Dans ce cas, les caractéristiques statistiques qu'il faut préciser sont le coefficient de variation (COV) et la loi de distribution
- Si les propriétés sont supposées varier en suivant un champ aléatoire, elles sont donc analysées par les méthodes statistiques spatiales où les caractéristiques statistiques sont la fonction d'autocorrélation qui représente le champ aléatoire, l'échelle de fluctuation et une loi de distribution.
- En fin, la théorie de variogramme qui est traité par la géostatistique basé.

Plusieurs auteurs ont abordé ces techniques, chacun selon son objectif, ces auteurs sont cités par Salloum en 2015 : (Einstein et Baecher, 1983; Emeriault et *al.*, 2004 ; Dubost et *al.*, 2007 ; Villavicencio et *al.*, 2011 ; Vanmarcke, 1980, 1983 ; Chilès et Delfiner, 1999; Mendes et Lorandi, 2008; Marache et *al.*, 2009a et Bourges et *al.*, 2012 in Salloum, 2015).

D'après les techniques qu'on cité, on comprend que la variabilité naturel est traitée par la méthode de statistique spatiale, la modélisation, dans ce cas, nécessite de quantifier les paramètres statistiques (Le coefficient de variation « COV », La moyenne, la loi de distribution de probabilité et la fonction d'autocorrélation), ce que nous allons aborder dans ce qui suit.

1. Loi de distribution :

La loi de distribution est représentée par une fonction densité de probabilité (PDF), déjà défini en premier chapitre mais pour l'enchaînement, on doit faire le rappel. La fonction *PDF* associe une probabilité à chaque intervalle d'un espace Ω pour les variables continues. La « densité de probabilité notée $f_X(x)$ a les propriétés suivantes :

$$f_X(x) \geq 0$$

$$\int_{-\infty}^{+\infty} f_X(x) dx = 1$$

$$P[a \leq x \leq b] = \int_{-\infty}^{+\infty} f_X(x) dx$$

Ici la variable aléatoire c'est X et qui peut prendre la valeur x .

Des distributions de probabilité empiriques sont disponibles pour estimer et ajuster les fonctions de distribution des données réelles collectées. Les fonctions de distribution d'analyse les plus courantes sont celles de la forme exponentielle (Baecher et Christian, 2003 in Salloum, 2015) :

$$f_X(x) = \exp(a + bx + bc^2) x^d$$

Les facteurs a , b et c sont des constantes, Les distributions dépendant de cette forme sont les lois Normale, Lognormale, Exponentielle, Gamma et Beta (Salloum, 2015).

D'après Popescu, 1995 ; Assimaki et *al.*, 2003 cités par Salloum en 2015, dans le domaine de la géotechnique la fonction de densité de probabilité des données correspondantes aux paramètres du sol suit généralement une distribution de type Log-normale, Gamma ou beta.

2. Coefficient de variation :

Par définition, le coefficient de variation d'une variable est le rapport entre l'écart type et la moyenne de cette grandeur. C'est une fonction adimensionnelle qui représente une mesure

relative de la dispersion des valeurs. Le coefficient de variation est donné par (Phoonet Kulhawy, 1999) :

$$COV = \frac{SD_w}{t} = \frac{\sqrt{\frac{1}{1-n} \sum_{i=1}^n [w(z_i)]^2}}{t}$$

Avec

SD_w est l'écart-type ;

$w(z_i)$ est la valeur de la fonction de fluctuation à la profondeur z_i ;

n est le nombre des points de mesures ;

t est la fonction de tendance.

3. Champ aléatoire :

La théorie des champs aléatoires c'est la méthode utilisée pour quantifier les fonctions et distances d'autocorrélation des propriétés du sol. Il est décrit comme une famille de variables aléatoires définies dans le temps ou dans l'espace. Un champ aléatoire peut consister en un seul paramètre qui peut être mécanique (Cohésion), physique (densité) ou chimique (taux de carbonate) etc., dans ce cas le champ est dit univarié ; comme il peut consister en plusieurs valeurs à la fois (cohésion, angle de frottement, contrainte de cisaillement), il est dit dans ce cas multivarié.

Les paramètres densité de probabilité et fonction d'autocorrélation caractérisant chaque champ aléatoire, ils montrent le degré de dépendance de deux valeurs du champ en deux endroits différents (variabilité dans l'espace) ou à deux instants différents (variabilité dans le temps). On peut donc remarquer que, pour une meilleure modélisation des paramètres du sol (meilleure représentation du champ aléatoire), il faut une bonne quantification de ses paramètres et particulièrement une bonne quantification de la distance d'autocorrélation. Ceci nécessite la connaissance des valeurs des paramètres à des endroits très proches dans l'espace (Salloum, 2015). On définit alors certaines notions caractéristiques au champ aléatoire (Salloum, 2015):

A. Homogénéité :

Un champ aléatoire défini dans l'espace est homogène si :

- sa moyenne et son écart-type sont constants à n'importe quelle position de l'espace,
- sa fonction d'autocorrélation ne dépend que de la distance entre deux positions.

B. Isotrope :

Un champ aléatoire est isotrope si sa fonction d'autocorrélation ne dépend pas de la direction.

C. Stationnarité (Invariabilité):

La stationnarité est l'hypothèse dont dépend en grande partie la modélisation statistique de la variabilité spatiale des sols (Salloum, 2015). La stationnarité désigne l'invariance d'une donnée statistique établie à la localisation spatiale. D'après Vanmarcke, 1983 cité par Salloum, 2015, « un processus de stationnarité faible a les propriétés suivantes :

- une moyenne constante (pas de tendance dans les données),
- une variance constante,
- la corrélation entre les valeurs du champ en deux endroits différents dépend seulement de la distance qui les sépare.»

4. Fonction d'autocorrélation et échelle de fluctuation :

Un champ aléatoire homogène $f(x)$ est caractérisé par sa fonction de covariance ou d'autocorrélation appelé aussi ACF, c'est une mesure de la dépendance de deux ou plusieurs points dans une série de données. L'échelle de fluctuation de cette fonction, exprime la forme et le degré de variabilité d'une propriété donnée, respectivement. A partir de mesures y_i équidistantes de x d'une propriété donnée, l'estimation de la valeur de la fonction d'autocorrélation entre deux valeurs d'une propriété distantes de τ peut être défini comme suit :

$$\rho_\tau = \frac{\sum_{i=1}^{n-\tau} (y_i - \bar{y}_i)(y_{i+\tau} - \bar{y}_{i+\tau})}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)^2}$$

$$\tau = 0, 1, 2, 3, \dots, n-1$$

Où n est le nombre des mesures de la propriété du sol y , et τ est le décalage de l'ensemble de données \bar{y}_i et $\bar{y}_{i+\tau}$ sont les valeurs de la tendance mesurées à x_i et $x_{i+\tau}$ respectivement

La fonction d'autocorrélation existent sous plusieurs modèles parmi les quels : les fonctions de type triangulaire, exponentiel du premier ordre, exponentiel du second ordre, etc (Salloum, 2015).

III. Origine et source d'incertitudes en géotechnique :

Les termes « aléatoire », « incertain », « variabilité », « erreur » sont couramment utilisés pour caractériser l'hétérogénéité des sols, mais leur sens, en particulier en géotechnique, est souvent mal compris ou mal employé. Plusieurs auteurs, ont essayé de préciser ces termes (Rao J.N.K., Wu, C.F.J. et Yue K. 1992 ; Magnan et al., 1994 ; Dubost, 2009). Ces recherches ont montré que : par opposition au phénomène déterministe, un phénomène est appelé aléatoire quand son résultat est variable, non ou mal maîtrisé, dans tous les cas imprévisibles (Rao J.N.K., Wu, C.F.J. et Yue K. 1992 ; Magnan et al., 1994 ; Dubost, 2009 ; Jenny, 1941 ; Burrough, 1993 in N. Salloum, 2015). Un phénomène est dit incertain si son résultat est inconnu, non vérifié, mais pas forcément imprévisible (Lacasse et Nadim, 1996; A. Nour, 2004 ; Uzielli et al, 2008 ; Y. Houmadi, 2011 ; F. Zibani, 2012 ; N. Salloum, 2015). Si un même phénomène géotechnique peut être mesuré en grand nombre de fois, dans les mêmes conditions (lieu, appareillage...), sans jamais présenter deux fois la même valeur. Le résultat de la mesure est donc variable, mais les causes de cette variabilité sont multiples et liées à différents types d'incertitudes (Favre J.-L. Touati K., 1995 ; Zibani, 2012).

1. Incertitudes passives ou épistémique:

Une propriété d'un sol, pour un lieu et un instant donné, a une valeur vraie, exacte. La mesure que l'on fait de cette propriété donne une valeur approchée de la valeur vraie. La différence entre la valeur vraie et la valeur mesurée est appelée erreur. Les incertitudes passives sont liées à la mesure que l'on fait d'un phénomène (Favre J.-L., 2000 ; A. Nour, 2004 ; Zibani, 2012).

A. Erreurs d'observations:

- i. **Les erreurs de mesure** :L'erreur de mesure proprement dite est directement liée à l'appareillage et à l'opérateur. Cette dispersion est aléatoire, et principalement liée à l'imprécision de l'appareil (Favre J.-L., 2000 ; A. Nour, 2004 ; Zibani, 2012 ; Salloum, 2015).
- ii. **Les erreurs de représentativité** :elles traduisent la transformation de la valeur physique (Zibani, 2012). L'interprétation de la mesure repose en général sur un modèle physico-mécanique (état de contraintes, comportement drainé ou non drainé, isotropie ...) qui peut être approché et peu représentatif des phénomènes mis en jeu lorsque l'ouvrage sollicitera le massif (Favre J.-L., 2000 ; Zibani, 2012 ; Salloum, 2015).
- iii. **Les erreurs de l'instant** :cette erreur provient de la variation de la propriété entre le moment où elle est mesurée et le moment où le matériau testé est sollicité. On peut ainsi citer la variation de teneur en eau d'un sol qui peut varier en fonction des conditions climatiques, de son transport éventuel, de son remaniement (Favre J.-L., 2000 ; Zibani, 2012).

B. Erreurs d'enquête :

- i. **Les erreurs d'enquête** : Cette erreur est liée à une mauvaise conduite des reconnaissances géotechniques par exemple : cas d'une profondeur de sondage insuffisante pour caractériser le sol sollicité par une fondation, ...etc.
- ii. **Les erreurs d'échantillonnage** : Même si les mesures étaient parfaites, la variabilité naturelle des propriétés du sol est modélisée comme une variable aléatoire dont les caractéristiques sont estimées à partir d'un échantillon de taille limitée par des intervalles de confiance (Benjamin J.R., Cornell C.A., 1970).

2. Incertitudes actives ou variabilité naturelle :

Une première incertitude pour une propriété d'un sol est donc liée à la mesure que l'on fait de cette propriété. La deuxième incertitude est dite active car elle est liée à la réalisation du phénomène physique que l'on observe (Favre J.-L. ,2000 ; Zibani, 2012). La variabilité

d'une propriété d'un sol est due aux conditions naturelles qui ont mené à sa création. Les processus géologiques de création des sols et des roches (érosion, transport, dépôt, mouvements tectoniques, transformations physico-chimiques...) laissent facilement comprendre que l'on rencontre des matériaux de natures minéralogiques et mécaniques différentes en fonction du lieu et du moment de dépôt (Favre J.-L., 2000 ; Zibani, 2012).

Les hétérogénéités géologiques qui sont sources d'incertitudes peuvent avoir des origines multiples (Favre J.-L., Touati K., 1995 ; Philipponnat et Hubert, 2002 ; Zibani, 2012) :

❖ La diversité lithologique : contrairement aux roches magmatiques ou métamorphiques qui sont généralement homogènes à l'échelle géotechnique, les formations sédimentaires peuvent présenter des variations verticales ou horizontales de faciès rapides et importantes (liées aux conditions de transport et de dépôt) et donc des couches aux caractéristiques mécaniques très différentes.

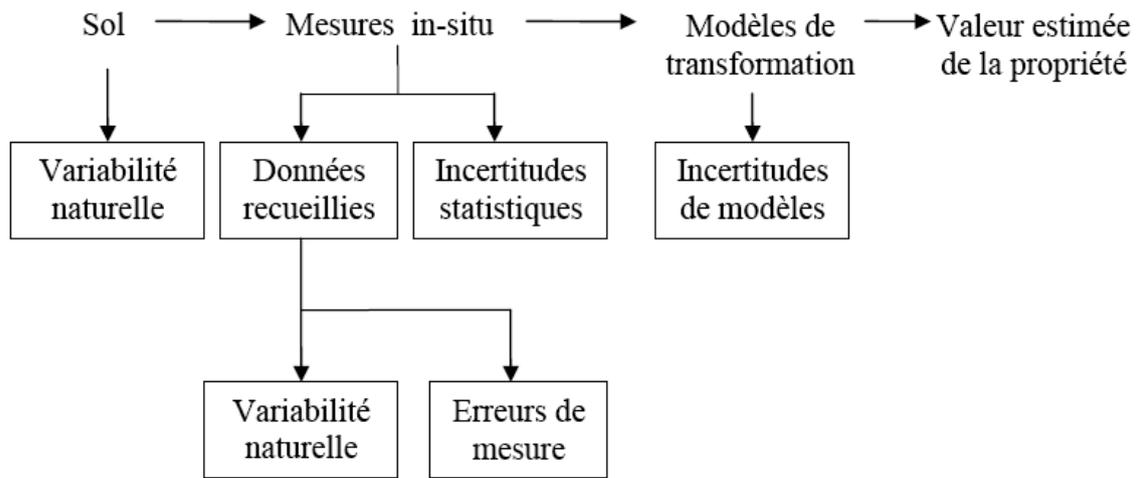
❖ Les accidents tectoniques : le rejet d'une faille peut mettre en évidence des roches de nature très différentes de part et d'autre de cet accident. D'autre part, des déformations dites souples affectent les formations géologiques et leur confèrent un pendage.

❖ L'altération : c'est une désagrégation des roches. Elle peut être plus ou moins importante en fonction de la roche et des conditions du milieu. L'épaisseur d'altération peut être très variable d'un endroit à un autre.

❖ Les phénomènes karstiques : c'est la formation de vides à cause de la dissolution. Ils ne concernent que certaines catégories de roches sédimentaires (gypses, calcaires,...) et sont influencés par les circulations d'eau et le réseau de fracturation du massif.

❖ Le remaniement anthropique : c'est la modification du milieu naturel par l'action humaine. L'exploitation minière, les mouvements de terre (remblais, déblais), les tranchées, etc., ont créé des discontinuités de l'état naturel du sol.

Lorsque ces cas de figure sont rencontrés, alors qu'ils n'étaient pas prévus, il est courant de les qualifier d'aléas géologiques. Si elles peuvent avoir un impact sur un projet quelconque, donc induire un risque, on parlera d'anomalies géotechniques. Ces anomalies sont en fait une variation forte, souvent ponctuelle, des propriétés d'un sol (Favre J.-L., Touati K., 1995 ; Zibani, 2012). La figure suivante résume les types d'incertitude et leurs origines (Y. Houmadi, 2011)



Figure(04) :Types des incertitudes des propriétés du sol

(Kulhawy, 1992 in Y. Houmadi, 2011).

Après avoir énuméré les différentes sources d'incertitude, il est évident de se poser la question : comment peut on procéder pour minimiser l'incertitude, avant d'établir tout analyse statistique. Dans ce qui suit nous présentons certaines précautions pour mener au mieux l'analyse statistique.

IV. Procédure à prendre en compte pour minimiser les incertitudes :

1. Choix de la valeur représentative :

La réalisation d'une étude de sol s'appuie sur l'étude de cartes et documents bibliographiques concernant le site ou des voisins proches, la réalisation d'un nombre limité de sondages in situ et d'essais de laboratoire. Pour cela la valeur prise dans le calcul doit être, selon Moussouteguy, 2002 :

A. **Représentative des matériaux affectés par la future structure.** Elle tient compte :

- de la variabilité naturelle des matériaux au sein d'une même formation ;
- de la qualité des essais réalisés ;

- de la sensibilité des appareils de mesures car plus le pas de mesure est important, plus le volume de sol auquel est attribuée la valeur est grand, plus les caractéristiques mesurées sont "lissées"

B. Raisonnement sécuritaire. Afin de tenir compte de l'hétérogénéité du site, qu'il ne connaît que partiellement, l'ingénieur prendra une valeur "raisonnablement" prudente. Toute quantification de ce degré "raisonnable" est extrêmement ardue, l'élimination de valeurs aberrantes ne suit aucune procédure normalisée et ne s'enseigne dans aucune école ou université.

C. Non pénalisante pour le projet. Le choix d'une valeur trop faible engendrerait des coûts superflus et pourrait aboutir au non réalisation du projet.

Plusieurs auteurs proposent d'utiliser les outils statistiques pour que le géotechnicien détermine, à partir d'un ensemble de mesures, les valeurs caractéristiques correspondant aux matériaux investis (MAHDAVI C, 1985). Ces approches considèrent les valeurs mesurées comme un échantillon d'une population inconnue. Les outils statistiques permettent alors de replacer la mesure, réalisée en un point donné, par rapport à l'ensemble de la population (le site).

2. Corrélations des paramètres géotechniques :

Cette étape suit généralement l'analyse des distributions des paramètres des sols. Le but de cette étude est d'établir une relation entre paramètres des sols pour limiter le nombre d'investigations géotechniques. En effet, en mécanique des sols, les caractéristiques utilisées décrivent le plus souvent des comportements d'ensemble qui sont la conséquence de phénomènes inter-particulaires. Ces phénomènes étant à l'origine de l'ensemble des propriétés du sol, il apparaît normal que pour un sol donné, il existe certaines relations entre ces différentes caractéristiques (MAGNAN J.P., 2000) .

Beaucoup d'auteurs synthétisent un grand nombre de corrélations établies entre essais in situ, essais in situ et essais de laboratoire et essais en laboratoire, comme nous l'avons constaté dans le chapitre I. Ces relations empiriques, qu'il n'est possible de caractériser que de

façon statistique, s'expliquent par le fait que l'ensemble des propriétés d'un sol évolue de façon cohérente traduisant un comportement général pour chaque grande classe de sol (MAGNAN J.P., 2000).

3. Variations spatiales des paramètres géotechniques

L'étude des variations spatiales consiste en l'analyse structurale d'un phénomène se développant dans l'espace et y montrant une certaine structure. L'application des techniques d'analyse statistique et probabiliste doit permettre à terme de traiter de façon quantitative l'influence de la variabilité naturelle des propriétés des sols sur le comportement des ouvrages et d'éliminer toute subjectivité dans le choix de l'ingénieur (Salloum ; 2015).

Ces techniques ont fait l'objet de plusieurs applications pour justement évaluer l'effet de la variabilité spatiale d'un certain nombre de paramètres (dits régionalisés) utilisés dans le dimensionnement des structures tels que le tassement, la capacité portante, les écoulements, la résistance des massifs rocheux, la stabilité des pentes, etc (Salloum ; 2015).

4. Contrôle de qualité des échantillons de sols :

Un programme d'assurance et de contrôle de la qualité est un ensemble d'étapes qui permettent de s'assurer que les résultats ont fournis une qualité satisfaisante pour répondre aux objectifs visés (Guide d'échantillonnage à des fins d'analyses environnementales : Cahier 5, 2010). Les procédures de prélèvement, de préservation et d'identification employées sur le terrain de même que celles utilisées en laboratoire pour la conservation, l'analyse et l'enregistrement des données sont tout aussi importantes pour arriver à des résultats de qualité. Un programme d'assurance et de contrôle de la qualité doit donc s'appliquer autant sur le terrain qu'en laboratoire (Guide d'échantillonnage à des fins d'analyses environnementales : Cahier 5, 2010). Une des étapes d'un programme d'assurance et de contrôle de la qualité consiste à préparer et à analyser des échantillons de contrôle qui permettront de mieux vérifier la qualité des résultats d'analyse (Guide d'échantillonnage à des fins d'analyses environnementales : Cahier 5, 2010).

A. Sur le terrain:

les types d'échantillons de contrôle couramment effectués sur le terrain lors de l'échantillonnage des différents milieux. Lors d'une campagne d'échantillonnage de sol, le prélèvement d'échantillons en duplicata constitue un mode de contrôle nécessaire dans tous les cas et une attention particulière doit être apportée afin de s'assurer de l'homogénéité des échantillons (Guide d'échantillonnage à des fins d'analyses environnementales : Cahier 5, 2010) . Un minimum de 10 % des échantillons doit généralement être prélevé en duplicata afin de vérifier la répliquabilité ou la reproductibilité des travaux d'échantillonnage selon qu'ils sont acheminés dans un seul laboratoire ou dans deux laboratoires différents (Guide d'échantillonnage à des fins d'analyses environnementales : Cahier 5, 2010). Dans ce dernier cas, il est important de s'assurer que le second laboratoire utilise des méthodes de préparation et d'analyse de performance équivalentes et de connaître la reproductibilité de la méthode d'analyse afin d'être en mesure de comparer les résultats d'analyse (Guide d'échantillonnage à des fins d'analyses environnementales : Cahier 5, 2010) . Par ailleurs, lorsque des échantillons de sol sont prélevés pour l'analyse de composés organiques volatils, des vides de transport et des vides de terrain sont généralement requis et doivent être interprétés adéquatement (Guide d'échantillonnage à des fins d'analyses environnementales : Cahier 5, 2010) . Selon les besoins de la campagne d'échantillonnage, des éléments de contrôle additionnels visant des objectifs spécifiques peuvent compléter l'interprétation des résultats tels que (Guide d'échantillonnage à des fins d'analyses environnementales : Cahier 5, 2010) :

i. l'échantillon de bruit de fond : blanc de terrain prélevé sur un site voisin non influencé par la source de contamination soupçonnée qui permet ainsi d'établir une valeur de référence ou une base de comparaison.

ii. l'échantillon répété : échantillon fractionné en plusieurs sous-échantillons représentatifs qui sont insérés à tour de rôle dans la chaîne d'activités selon une fréquence habituellement préétablie et qui permettent de juger de la répétabilité des résultats obtenus au cours d'une longue campagne d'échantillonnage. Les données liées au contrôle de qualité des prélèvements doivent toujours être présentées afin de permettre une meilleure appréciation des résultats des travaux d'échantillonnage.

B. En laboratoire:

Le programme d'assurance et de contrôle de la qualité en laboratoire requiert également l'utilisation et l'analyse d'échantillons de contrôle. Ces contrôles peuvent être, sans s'y restreindre, des contrôles intégrés, des échantillons témoins, des échantillons de référence, des blancs de procédure et des échantillons en duplicata faits en laboratoire (Guide d'échantillonnage à des fins d'analyses environnementales : Cahier 5, 2010). Il ne revient pas au responsable de l'échantillonnage de préparer ces contrôles. Cependant, lors de la planification de la campagne d'échantillonnage et du choix du laboratoire, il est important de s'assurer que le laboratoire applique en routine un programme d'assurance et de contrôle de la qualité adéquat répondant aux exigences du programme d'accréditation des laboratoires d'analyse (DR-12-PALA).

Les données liées au contrôle de la qualité doivent toujours être disponibles à la demande avec les résultats d'analyse. Ces données devraient être interprétées par le laboratoire d'analyse et inclure une appréciation globale de celles-ci (Guide d'échantillonnage à des fins d'analyses environnementales : Cahier 5, 2010).

V.Élimination des données atypiques:

L'une des étapes de routine de l'analyse statistique implique la suppression des données obscurcies analysés parce qu'ils sont tellement différents des autres. Dans certains cas, cela fait partie du modèle analytique : une pluie catastrophique ou un tremblement de terre de magnitude élevé peut être considéré comme un événement rare avec un long temps de retour et retiré de l'analyse des risques pendant une période limitée (Dubost J ; 2009). Mais, en ce qui concerne les propriétés du sol ci-dessus c'est le manque des données qui est pris en considération. Les auteurs (Glasson-Cicognani et Berchtold ; 2010) traitant des données manquantes distinguent des formes de répartition des données manquantes et des mécanismes conduisant à ces dernières. La répartition des données manquantes décrit les dispositions des valeurs présentes et celles qui sont manquantes dans la matrice indicatrice. Les mécanismes à l'origine des données manquantes décrivent la relation probabiliste entre les valeurs observées et les valeurs manquantes de la table de données.

Les données manquantes se répartissent selon différents cas de figures (Graham, 2012; Little et Rubin, 2002) dont les trois principaux sont :

- les valeurs manquantes univariées ;
- les valeurs manquantes monotones ;
- les valeurs manquantes non monotones ou arbitraires.

Cette distinction est fonction de la matrice indicatrice des valeurs manquantes. Cette matrice est dite à **valeurs manquantes univariées** ou de non-réponse univariée, lorsque pour une variable donnée, si une observation est absente, alors toutes les observations suivantes pour cette variable sont absentes. Ce cas de figure est qualifié de problème de la parcelle manquante où, pour une raison quelconque, un facteur à l'étude est non disponible. Les **valeurs manquantes monotones** surviennent lorsque la valeur d'une variable Y_j manquante pour un individu i implique que toutes les variables suivantes Y_k ($k > j$) sont manquantes pour cet individu. Les **valeurs manquantes arbitraires** ou non monotones ou encore générales, surviennent lorsque la matrice ne dessine spécifiquement aucune des formes précédentes.

Conclusion

Les erreurs en géotechnique sont dues à la connaissance que l'on a du sol : la reconnaissance des sols que l'on réalise est insuffisante, les sols présentent une variabilité naturelle à toutes les échelles, la modélisation n'est qu'une représentation de la réalité. Chacune de ces erreurs présente une part aléatoire et une part d'incertitude.

Les incertitudes passives et de modèles peuvent être réduites par le développement et la connaissance des outils et techniques de mesures et de modélisations, par la qualité de leur mise en œuvre, par l'augmentation de leur nombre et de leur précision, etc.

Il ressort que la sécurité attachée à un projet (absence de désordres sur le bâti, les avoisinants et l'environnement) est d'autant plus grande que la connaissance du site est complète (combinaison des différentes méthodes d'investigation), que les imprévus sont peu nombreux (réduction des erreurs par le recours aux approches statistiques, probabilistes et géostatistiques), que les effets induits par les modifications du site sont pris en compte (un modèle du sol le plus juste possible).

Donc l'obtention de résultats crédibles est conditionnée par la qualité et la quantité de l'information de départ, ainsi que par la localisation des points de mesure pour les méthodes statistiques.

Dans le chapitre suivant, nous représenterons par d'importants exemples l'apport des méthodes statistiques dans la caractérisation et la modélisation des sols en géotechnique. Ces exemples concernent les sols de la région de Tébessa (Nord-Est, Algérie) et certains dans d'autres régions en Algérie.

Chapitre III :
Aperçu sur l'apport des méthodes statistique
pour la caractérisation géotechnique des sols
en Algérie

Introduction

L'utilisation des méthodes statistiques, pour la caractérisation géotechnique des sites, permet de caractériser la variabilité naturelle des propriétés physiques et mécaniques des sols. Ceci permettra de définir les hypothèses de calculs, et de rendre plus efficace la reconnaissance géotechnique, en jouant sur la position et le nombre des sondages (Magnan, 1982). Dans le cas où le nombre des essais et plus précisément des valeurs des essais, serait suffisant, on peut aboutir à des corrélations représentatives concernant les différentes propriétés d'un même type de sol.

Dans ce chapitre, nous donnerons quelque exemples des méthodes de modélisations statistique qui ont été appliqué par les chercheurs dans certains région de Tébessa (Nord-Est, Algéries).

I. Exemple01: « La pression de gonflement des sol argileux a la région de Tébessa.»

Par l'intitulé ci-dessus, Y. Berrah en 2008 a présenté son étude dont l'objectif est conçu pour l'étude de la compressibilité du sol, et également les mesures des paramètres de gonflement. La méthode d'analyse utilisée est l'analyse adimensionnelle.

Cette méthode est une technique mathématique utilisée pour trouver des paramètres appelés adimensionnels (appelés nombres π), introduits par Buckingham en 1914. Deux grandes fonctions importantes par cette analyse: la théorie et la construction de modèles. Dans ce dernier, tout système physique peut être analysé via des fonctions ayant un nombre limité de variables fondamentales qui définissent son équation d'état doit resté invariant (Berrah, 2008).

L'établissement du modèle sans dimension pour la prédiction de la pression de gonflement du sol est déterminé par un nombre maximal possible de variables qui sont:

- Des paramètres physiques (γ_d (kN/m³), w (%), I_p (%), w_L (%), F_f (%)),
- Des paramètres mécanique (P_s (kPa), P_c (kPa)).

Dans son traitement, Berrah (2008) suppose que la pression de gonflement des sols soit une fonction du poids volumique sec γ_d , de la teneur en eau w_L , de l'indice de plasticité I_p , de la limite de liquidité w_L , du pourcentage de la fraction fine F_f et de la pression de préconsolidation P_c . Dans cette étude, la pression de gonflement peut être exprimée par l'équation :

$$P_s = P_s(P_c, M_s, M_w, M_{wL}, M_{Ip}, M_{Ff}, \gamma_d, \gamma_w) \quad (1) \text{ Cette équation (1) peut s'écrire:}$$

$$f(P_s, P_c, M_s, M_w, M_{wL}, M_{Ip}, M_{Ff}, \gamma_d, \gamma_w) = 0 \quad (2)$$

Où M_s représente la masse des particules solides, et pareillement pour les autres paramètres (w, I_p, w_L, F_f). D'après cette l'équation, neuf paramètres dimensionnels sont nécessaires pour décrire le problème de gonflement.

Pour déterminer les deux fonctions des équations (1) ou (2), il est nécessaire d'effectuer un grand nombre d'essais, ce qui n'est pas pratique. La théorie de l'analyse adimensionnelle montre qu'il est possible d'utiliser moins de variables sans dimension pour décrire le problème de gonflement. Selon le théorème π de Buckingham (1914), le nombre de variables sans dimension nécessaire pour décrire le problème est égal au nombre de variables dimensionnelles (qui sont dans ce cas égal à neuf) comme indiqué par l'équation (2).

Pour ce modèle, trois variables sans dimension sont nécessaires pour décrire le problème : la masse M (kg), la longueur L (m) et le temps T (sec). Ces variables sans dimension peuvent être identifiées à l'aide du théorème π de Buckingham et sont formées à partir de produits de puissances de certaines variables dimensionnelles originales. Tous ces groupes sans dimension peuvent être écrits comme suit (Berrah, 2008) :

$$\pi = P_s^a P_c^b M_s^c M_w^d M_{wL}^e M_{Ip}^f M_{Ff}^g \gamma_d^h \gamma_w^i \quad (3)$$

Par substituons les dimensions (unités) pour tous les variables dans l'équation (3) devient

$$\pi = \left[\frac{M}{LT^2} \right]^{a+b} \cdot M^{c+d+e+f+g+h+i} \cdot L^{-3(h+i)} \quad (4)$$

Pourquoi π soit adimensionnel, la somme des puissances de chaque dimension fondamentale doit être égale à zéro :

$$\begin{cases} a + b = 0 \\ c + d + e + f + g + h + i = 0 \\ -3(h + i) = 0 \end{cases} \quad (5)$$

Qui est un ensemble de trois équations à neuf inconnues; Selon l'algèbre linéaire, le nombre de solutions distinctives de l'équation (5) est six ($9 - 3 = 6$), ce qui coïncide avec le théorème π . Afin d'obtenir les six solutions distinctives, il y'a des choix gratuits sur six des neuf composantes. Si le choix est : $a = 1, h = 0$ et $c = d = e = f = 0$, la solution de l'équation (5) devient $b = -1, i = 0$ et $g = 0$, ce qui nous donne la première variable non dimensionnelle :

$$\pi_1 = P_s/P_c \quad (6)$$

De la même manière, les autres variables non dimensionnelles obtenues comme suit:

$$\pi_2 = w \quad (7)$$

$$\pi_3 = w_L \quad (8)$$

$$\pi_4 = I_p \quad (9)$$

$$\pi_5 = F_f \quad (10)$$

$$\pi_6 = \frac{\gamma_d}{\gamma_h} = \rho_d \quad (11)$$

Eq. (4) peut être écrite comme suit: $F(\pi_1, \pi_2, \pi_3, \pi_4, \pi_5, \pi_6) = 0$, Ou

$$P_s/P_c = F(w, I_p, w_L, F_f, \rho_d) \quad (12)$$

Par opposition aux neuf variables dimensionnelles de départ, le nombre de variables non dimensionnelles est six (6). Les groupes non dimensionnels obtenus sont à la base des masses et des volumes dont les transformations simples sont bien connues dans la mécanique des sols pour conduire à une dépendance de (P_s/P_c) des dimensions suivantes (teneur en eau, limite de liquide, indice de plasticité, Le pourcentage de la fraction fine du sol $F_f < 80\mu\text{m}$ et la densité à sèche). Cela permet d'exploiter les données de laboratoire sur la base des paramètres calculés directement et liés aux dimensions de masse et de volume. Après remplacement de ces groupes dans l'équation (12), l'équation obtenue devient:

$$\frac{P_s}{P_c} = w^a \cdot w_L^b \cdot I_p^c \cdot F_f^d \cdot \rho_d^e \quad (13)$$

Les inconnues (a, b, c, d, e) sont calculé par la méthode pseudo-inverse à l'aide du programme Matlab où 86 sur 132 échantillons analysés en laboratoire a été utilisé pour calculer les inconnues. Les résultats obtenus sont :

$$a=-0.82, b=0.37, c=1.04, d=-0.38, e=-1.86,$$

L'équation finale devient:

$$P_s = w^{-0.82} \cdot w_L^{0.37} \cdot I_p^{1.04} \cdot F_f^{-0.38} \cdot \rho_d^{-1.86} \cdot P_c \quad (14)$$

L'expression graphique du modèle est montrée par la figure (05). D'après cette figure les valeurs prédites de la pression de gonflement obtenues est en bonne concordance avec celles mesurer directement au laboratoire.

La figure (02) montre que la relation entre les pressions de gonflement prédites et celles expérimentale peut être représentée par une courbe linéaire avec un meilleur ajustement où un coefficient de détermination est de $R^2 = 0,96$.

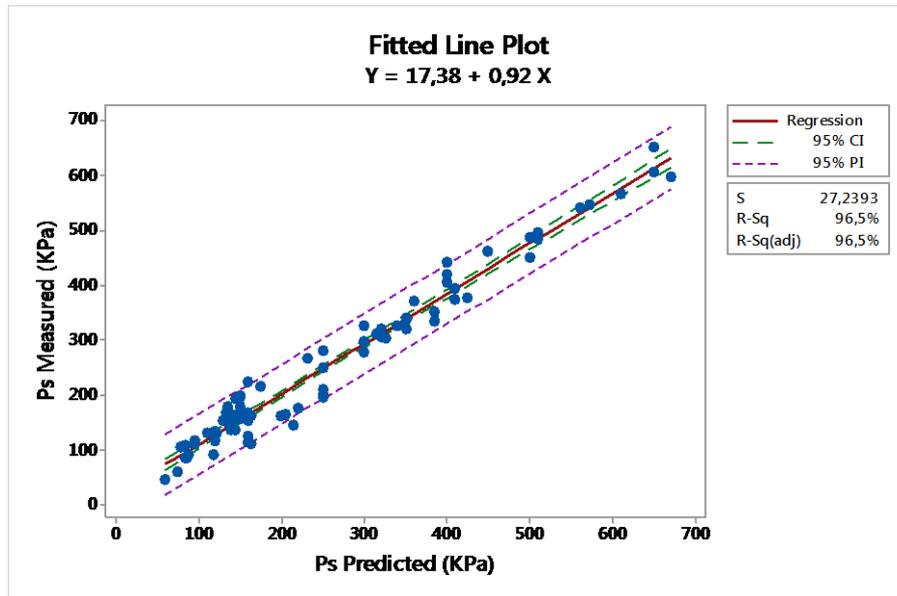


figure (05) : Valeurs de la pression de gonflement expérimentales (Ps Expérimentale) vs. Les valeurs de la pression de gonflement prédites (Ps Théorique) (Berrah, 2008).

Avec: CI: intervalle de confiance, PI: intervalle de prédiction.

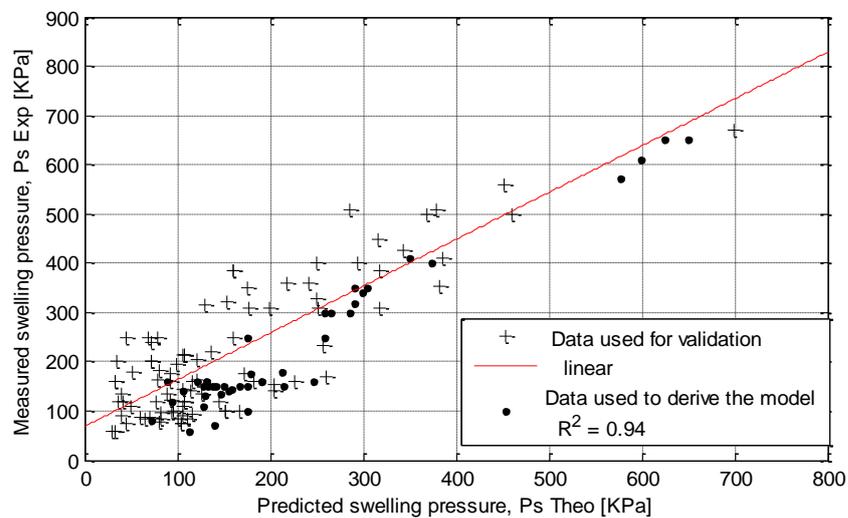


figure (06) : Corrélation du model proposé (représentation avec toute la base de donnée) (Barreh, 2008).

II. Exemple 02 : « Caractérisation minéralogique, physique et cartographie des sols gonflants dans la Bassi. De Tébessa, impact sur le plan d'aménagement »

Dans son travail intitulé « Caractérisation minéralogique, physique et cartographie des sols gonflants dans la Bassi. De Tébessa, impact sur le plan d'aménagement ». M. Aoun en 2016 à présenté une étude qui prend en considération, la caractérisation des sols de la région d'El Kouif (W. de Tébessa) vis-à-vis du problème de retrait-gonflement. Cette étude est s'inscrit donc dans le contexte des préoccupations actuelles liées aux problèmes causé par le retrait gonflement des sols argileux.

La méthode statistique utilisé dans ce travail c'est la régression linéaire multiple, cette méthode consiste à chercher une relation linéaire entre X qui est la variable explicative (variable de régression) et Y qui est la variable à expliquer c'est-à-dire pour laquelle on cherche une réponse (M. Aoun, 2016).

Le travail est organisé en deux étapes : Etape confirmatoire et analyse exploratoire

Etape confirmatoire qui consiste à la régression linéaire multiple est et prévision des caractéristiques de gonflement. La régression linéaire permet d'étudier la relation entre une variable dépendante (Y) et un ensemble de p variables (plusieurs variables) indépendantes (les X_j) considérées simultanément. Le modèle dans ce cas constitue la généralisation naturelle de la régression simple.

$$y_i = a_0 + a_1 X_1 + a_2 X_2 + \dots + a_p X_p$$

Où

- a_0 = l'ordonnée à l'origine, c'est une constante appelée intercept.
- a_1, a_2, a_p, a_n , sont les coefficients de régression des prédicteurs X_1, X_2, X_p, X_n .

Les paramètres choisis sont celles retenues après avoir effectué l'homogénéisation des différents paramètres. Il s'agit des limites d'Atterberg (Limite de liquidité LL et indice de plasticité PI), l'activité A des sols, la fraction argileuse CF notée par J en mécanique des sols, la valeur du bleu de méthylène VB et la pression de gonflement libre (Sewell Pressure) SP noté par P_g . L'objectif est de chercher à estimer ce dernier paramètre à partir des cinq autres paramètres.

1. **Analyse exploratoire des paramètres géotechniques :** La figure (06) montre la relation linéaire entre les paramètres géotechniques, on remarque une bonne corrélation entre les paramètres pris deux à deux, ce qui reflète le bon choix de ces paramètres et également indique que l'affinité des sols à l'eau est très grande, ils sont donc caractérisés par une très forte habilité au gonflement.

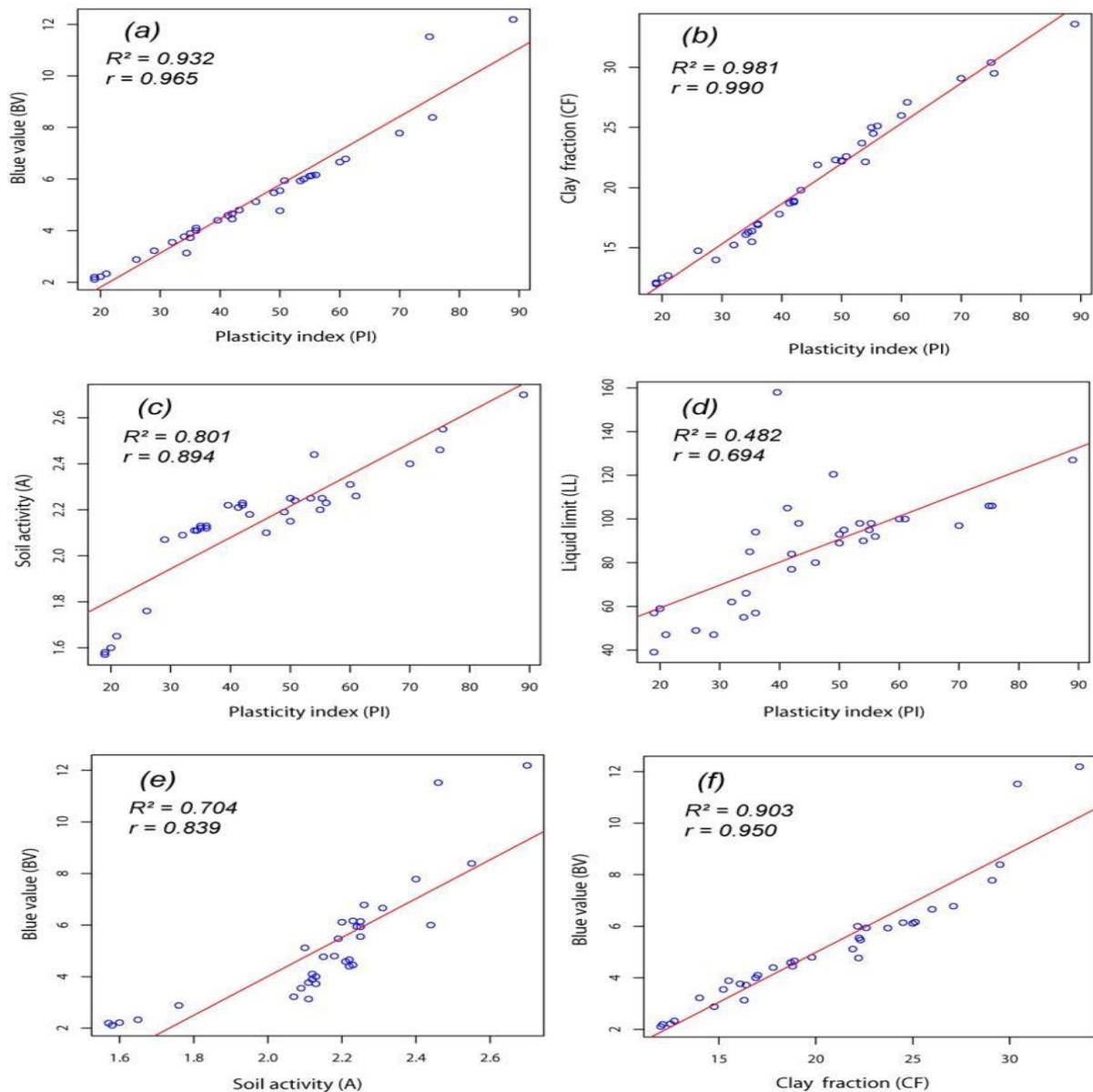


figure (07) : Nuages de points montrant les corrélations entre les différents paramètres physiques du sol étudié (M. Aoun, 2016)

La figure (07) montre les diagrammes en boîte à moustache, dans la majorité, la médiane des paramètres est nettement penchée vers les valeurs les plus élevées ce qui traduit toujours l'affinité des sols à l'eau et leur prédisposition au phénomène traité (gonflement).

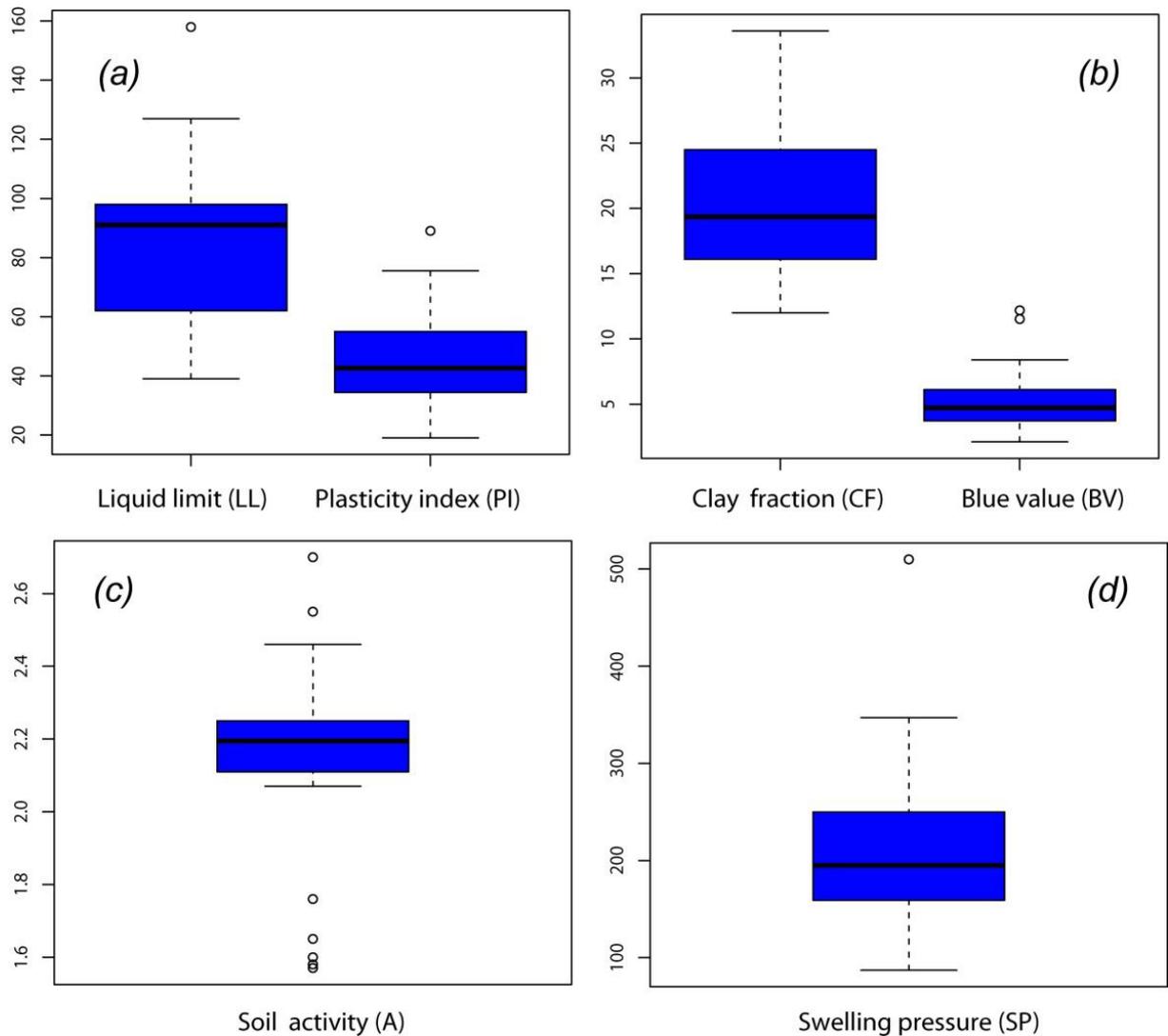


figure (08) :Diagrammes en boîte des paramètres géotechniques (M. Aoun, 2016)

La figure (08) montre la bonne corrélation de la pression de gonflement (P_s) avec les paramètres géotechniques. Donc le modèle de prévision de la P_s en fonction de ces paramètres est donné par la figure (09)

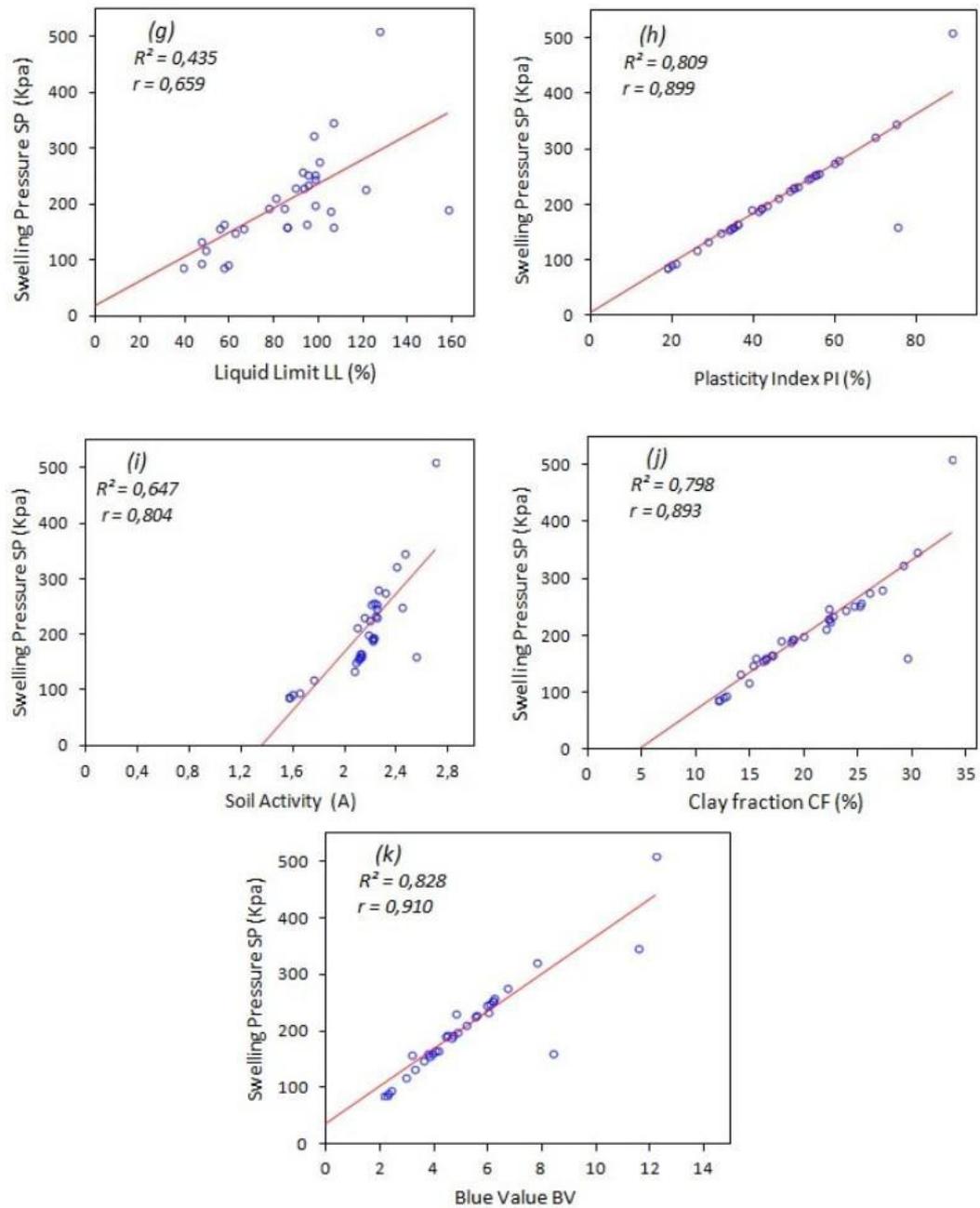


figure (09) :Nuages de points montrant les corrélations les paramètres physiques du sol étudié et la pression de gonflement libre (Aoun, 2016)

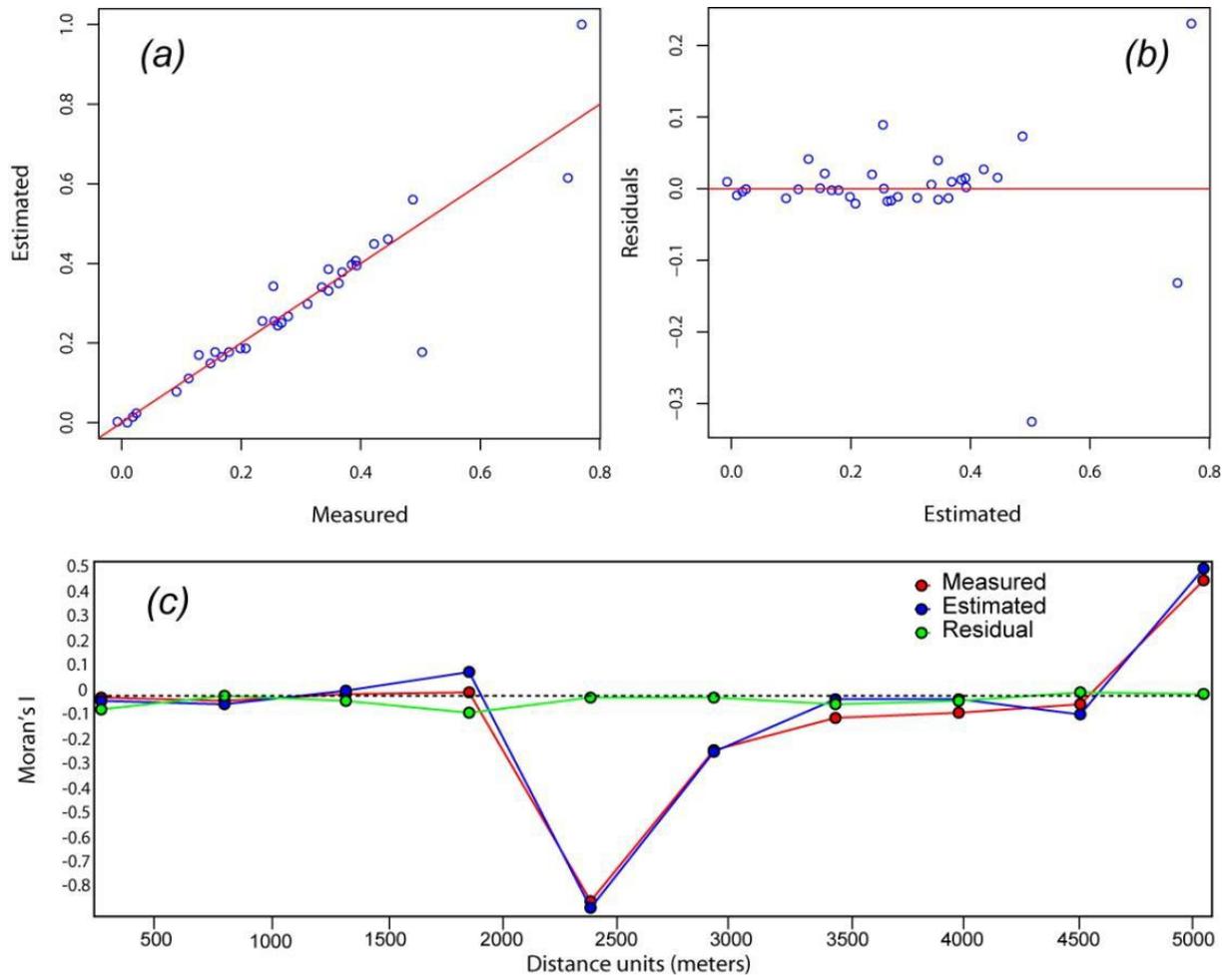


Figure (10) : Relation entre la pression de gonflement mesurée et estimée (M. Aoun, 2016).

L'équation de ce modèle s'écrit sous la forme :

$$Ps = -0.009 + 0.058LL - 1.034PI + 0.254A + 0.798 CF + 0.719VB$$

Ce modèle se trouve applicable pour la prévision rapide de la pression de gonflement des sols de la région étudié (Aoun, 2016)

III. Exemple 03 :

Dans l'année 2011, S. KHALFAOUI a présenté une étude intitulé par « Evaluation géostatistique des paramètres géotechniques des différents sols du Nord – Est algérien ».

La méthode utilisée dans ce travail c'est l'analyse en composantes principales (ACP).

C'est une méthode d'analyse factorielle qui permet de construire des facteurs considérés comme des nouvelles variables indépendantes ou non corrélés sur le plan statistique. Elle facilite la recherche des relations entre les variables initiales. L'objectif principal est d'arracher, sous une forme condensée, le maximum possible de l'information contenue dans les données, on considère dans cette méthode, la liaisons entre les variables et la liaisons des individus (essais).

D'après S. Khalfaoui, 2011, Les matrices de corrélation ont permis de déterminer les différentes corrélations positives et négatives. Les corrélations de ϕd et Wl avec les autres paramètres sont données au Tableau H.

Le calcul des facteurs de charge et les tracés des cercles de corrélations, a donné les différentes associations montré au Tableau I. Les mêmes associations sont rencontrées dans le socle et le Trias.

L'ensemble des paramètres géotechnique : Cc, Cg et Cs se trouve dans tous les types de sols. Il en est de même pour l'association Wl et Ip.

Tableau (02): Corrélations entre les paramètres géotechniques pour les cinq types des sols du Nord – Est Algerien (S. Khalfaoui, 2011)

| | Wl | Wl | γd | ϕd |
|---------------------|---------------------------|----------------------|--------------------------------|---------------------------------------|
| Faciès | Corrélation positive | Corrélation négative | Corrélation positive | Corrélation négative |
| Socle | $\gamma d, Pc, Ip$ | Cg, SO4 | P0, Ip, Wl | n |
| Trias | Wn, Cg, ϕ , Ip | γd | Wn, Sr, Po, Pc, Cu, Wopt, e | Wl, CBR, γs , Cs |
| Jurassique - Eocène | $\gamma h, \gamma d, Wn$ | _____ | Wn, P0, Wopt, n, Wl, CBR | Rp, e, γopt , SO4, Cg, Cc, Pc |
| Oligocène | Ip, ϕ , γopt | Cs | Cs, Pc | Wn, CaCO3 |
| Mio-pliocène | Pc, Wopt | γs | Pc, P0, Cc, ϕ , SO4, Wopt | Wn, Cu, e, Rp, Ip |

Tableau (03) - Répartition des paramètres géotechnique dans les sols des principales formations géologiques (S. Khalfaoui, 2011)

| Faciès | Asso1 | Asso2 | Asso3 | Asso4 | Asso5 | Asso6 |
|---|--|---|--|-----------------------------------|---------------------------|-------------------------------------|
| Socle | n, Rp, Pc | Wn,, Wl, Ip, ϕ | Cs, Cc, Cg, γ_h , γ_{opt} | e,SO4, γ_s , CBR, Sr | Pc,Rp,Wn, Wl, ϕ | n, Cs, Cc, Pc, Cg |
| Trias | n, Rp, Pc | Wn,Wl, Ip, ϕ | Cs, Cc, Cg, γ_h , γ_{opt} , | e,SO4, γ_s , CBR, Sr | n, Cs, Cc, Pc, Cg | Rp, Wn, Wl, ϕ , n, Pc |
| Oligocène | Cs, Cc, Cg, Pc, Rp, <i>h</i> | Cu,Wl, Wopt, ϕ , γ_{opt} | CBR, P0 | CaCO3, Wn, Sr, Cc | - | - |
| Jurassique - Eocène | γ_{opt} , Wn, γ_d, γ_h | CaCO3, SO4 | Wopt, Cc | Wl, Ip | Cc, Cg, Pc | ϕ , Cs, γ_s , CBR |
| Miocène SO4, | γ_d , γ_h , γ_{opt} , P0, Pc | e, Cu, Ip, Rp, Wn | Cs, Cc, Cg | CBR, Wl, Wopt, Ip | CaCO3, SO4, Sr, ϕ | γ_s , n |

1. Evaluation géostatistique du tassement

La géostatistique (théorie des variables régionalisées), étudie les fonctions aléatoires. (Matheron (1962a); Matheron (1962b), in S. Khalfaoui, 2011), elle introduit la notion de variables régionalisées pour quantifier un phénomène à caractère aléatoire présentant une

structure de variabilité spatiale. S. Khalfaoui, 2011 à cité l'exemple des paramètres géotechniques et le tassement (S).

Si on compte les corrélations régionalisées des paramètres de reconnaissance, par l'utilisation des variogrammes, on peut estimation leur valeur à n'importe quel point ou leur valeur moyenne dans n'importe quel volume de l'espace de définition, ainsi que le calcul de la variance d'estimation peut se faire à l'aide de krigeage ordinaire qui tiens 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 (S. Khalfaoui, 2011). La répartition spatiale et les valeurs des variances de krigeage permettent donc de se prononcer sur la qualité du dispositif de reconnaissance (S. Khalfaoui, 2011).

Dans cette étude, la déformation verticale du sol a été choisie comme variable régionalisée, dont l'outil de base qui caractérise la fonction aléatoire est le variogramme. Le tassement du sol a été calculé par la méthode odoométrique dans certains nombres des sites représentant les cinq types du sol caractérisant le Nord – Est Algérien (S. Khalfaoui, 2011).

Les variogrammes de surfaces présentent des anisotropies variables (Pannatier, 1995 in S. Khalfaoui, 2011). Les variogrammes expérimentaux omnidirectionnels ont été calculés et modélisés par des schémas sphérique montrent un effet de pipite qui varie entre 0.44 et 3.25 m² pour les cinq type de sol (S. Khalfaoui, 2011):

Formations Socle : $\gamma(h) = 2.13 + 5. \gamma_{\text{exp}}(430\text{m})$

Formations d'âge Trias : $\gamma(h) = 0.44 + 1.54. \gamma_{\text{sph}}(197\text{m})$

Formations d'âge Jurassique – Eocène : $\gamma(h) = 3,25 + 24,75. \gamma_{\text{sph}}(609,0\text{m})$

Formations d'âge Oligocène: $\gamma(h) = 2.04 + 12. \gamma_{\text{sxp}}(295\text{m})$

Formations d'âge Moi –pliocène : $\gamma(h) = 1.46 + 3 ,55. \gamma_{\text{sph}}(377\text{m})$

Tableau (04) : Variographie du tassement des formations Socle, Formations d'âge Trias (S. Khalfaoui, 2011)

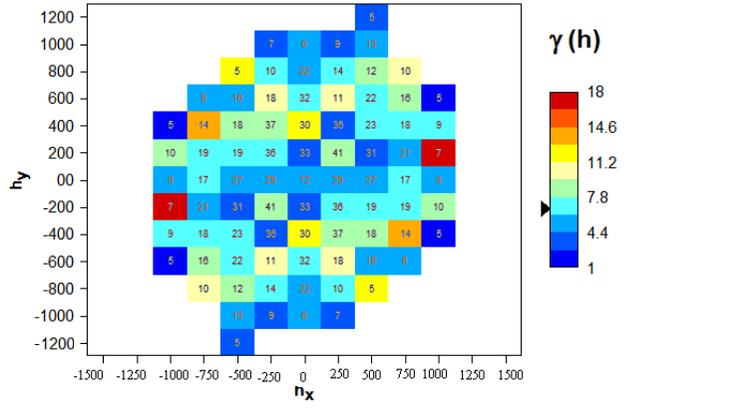
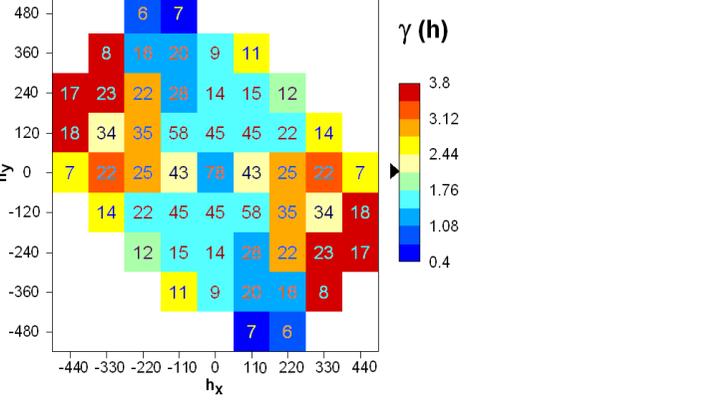
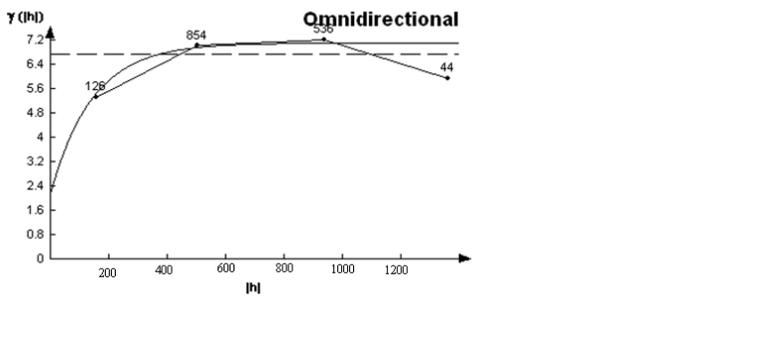
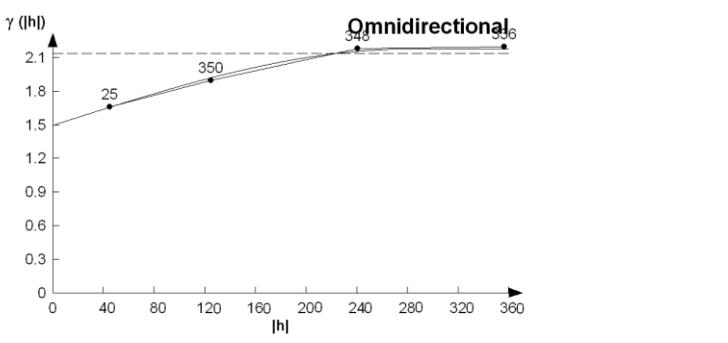
| Faciès | Formations Socle | Faciès | Formations d'âge Trias |
|------------------------------|---|------------------------------|--|
| Variogramme de surface |  | Variogramme de surface |  |
| Variogramme Omnidirectionnel |  | Variogramme omnidirectionnel |  |
| Model d'ajustement | Exponentiel | Model d'ajustement | Sphérique |

Tableau (05) - Variographie du tassement des formations d'âge Jurassique – Eocène, d'âge Oligocène

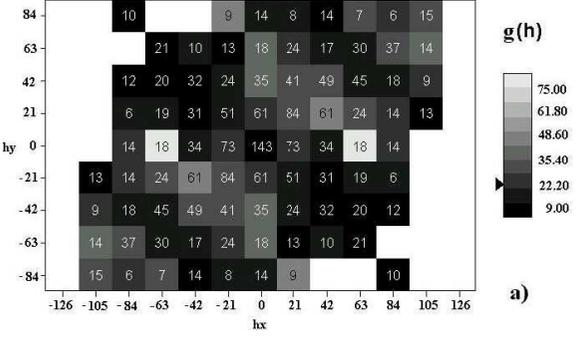
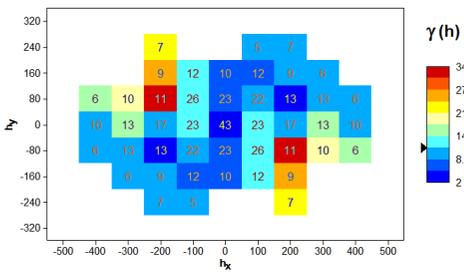
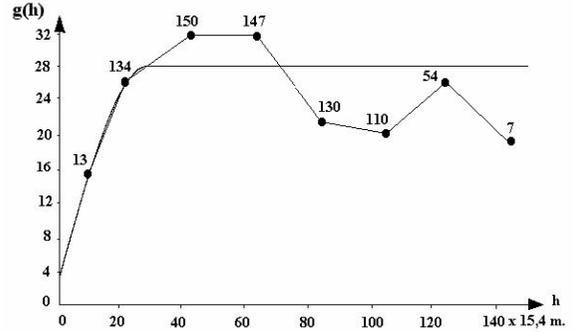
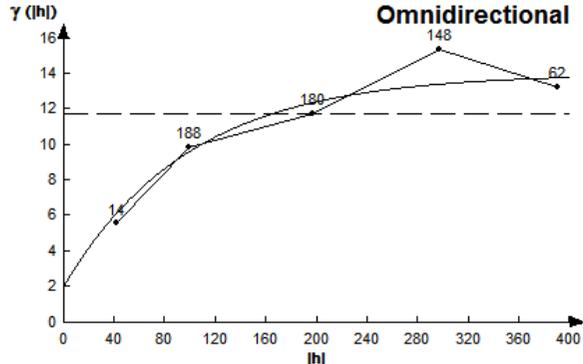
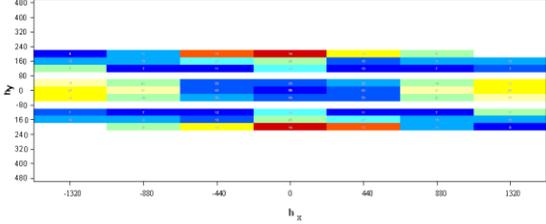
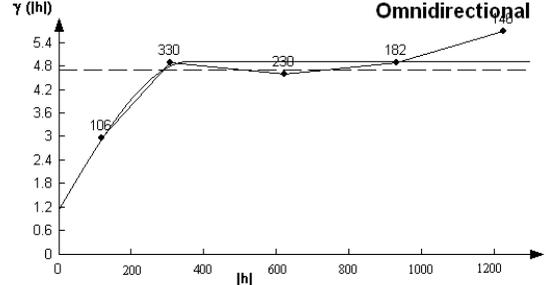
| Faciès | Formations d'âge Jurassique – Eocène | Faciès | Formations d'âge Oligocène |
|-------------------------------------|--|-------------------------------------|--|
| Variogramme de surface |  <p>a)</p> | Variogramme de surface |  |
| Variogramme omnidirectionnel |  | Variogramme omnidirectionnel |  |
| Model d'ajustement | Sphérique | Model d'ajustement | Exponentiel |

Tableau (06)- Variographie du tassement des formations d'âge

| | |
|------------------------------|---|
| Faciès | Formations d'âge Mio-Pliocène |
| Variogramme de surface |  |
| Variogramme Omnidirectionnel |  |
| Model d'ajustement | Sphérique |

Krigeage ordinaire du tassement :

Les résultats de la variographie du tassement de ces différents sols ont été utilisés pour le krigeage. La moyenne des valeurs krigées varie de 3,13 à 30,87 cm. Une variance de krigeage variée 1,82 et 9,93 cm². L'erreur relative est calculée par l'équation suivante :

$$\delta = \frac{2}{\text{Moy}} \sqrt{\sigma k^2} \cdot 100$$

Tableau (07) : Résultats de krigeage ordinaire du tassement des types des sols

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

Note :

- \bar{X} : Moyenne des isovaleurs krigés de tassement (cm)
- S^2 : Moyenne de variance de krigeage de tassement (cm²)
- σ^2_k : Variance d'estimation krigée (cm²)
- N.B : Nombre de bloc krigés
- δ (%): Erreur relative (%)

On conclusion de ce travail, Le Nord Est algérien se compose de cinq principales formations géologiques : les formations du socle, du Trias, Jurassique-Eocène, les formations Oligocène (des séries numidiennes) et celles du Mio-pliocène. Ces formations ont été altérées à cause des différents types de désagréations physique et mécanique. Les matrices de corrélation ont permis de déterminer les différentes corrélations positives et négatives.

Les variogrammes expérimentaux de surface présentent plusieurs anisotropies. Les variogrammes expérimentaux omnidirectionnels ont été ajustés à l'aide de différents modèles. « Il est remarqué que les portées varient de 377m à 608m. Les erreurs relatives sont quelque fois très fortes exemple : 86% pour le Socle ; Ceci est du au fait que sur ces sites les mailles étaient irrégulières. La portée du variogramme est de 430 m. Une maille de 200x200 m peut donc être satisfaisante. Ces tableaux peuvent être utilisés comme références pour préparer les campagnes d'investigations sur ces différents types de sols » (S. Khalfaoui, 2016)

IV. Critiques des méthodes appliquées :

1. Exemple 1 et 2 :

Pour les deux premiers exemples : Exemple 1 intitulé « La pression de gonflement des sols argileux à la région de Tébessa. » réalisé par Berrah Yacine en 2008 et l'exemple 2 « Caractérisation minéralogique, physique et cartographie des sols gonflants dans la Bassi. De Tébessa, impact sur le plan d'aménagement » réalisé par M. Aoun en 2016, dans ces deux études l'objectif principal est de chercher une équation qui permet de prévoir rapidement les paramètres de gonflement des sols (pression de gonflement). Pour établir une telle équation, il est nécessaire de chercher une relation bien définie entre tous les paramètres utilisés pour la prévision, de telle relation peut être linéaire, exponentielle, logarithmique, ... etc.

Dans le cas de ces deux exemples, les chercheurs ont abouti à une relation linéaire avec des coefficients de corrélation très élevés (R est très proche de 1). Nous remarquons alors que cette relation ne tient pas compte des valeurs très élevées des paramètres géotechniques des sols, tel que par exemple l'indice de plasticité (I_p), la limite de liquidité (W_L), certaines valeurs élevées de la pression de gonflement mesurée au laboratoire, ... etc. Pour ces corrélations, les valeurs élevées sont considérées comme des valeurs aberrantes qui gênent la corrélation et l'ajustement.

Par contre, en géotechnique, de telles valeurs reflètent l'état critique du sol et conditionnent le comportement mécanique du sol. Si à partir des essais en laboratoire on rencontre des valeurs élevées de la limite de liquidité, l'indice de plasticité, les paramètres de gonflement en général (pression de gonflement, indice de gonflement, pression de consolidation), de la valeur du bleu de méthylène, ... etc. Ce qui veut dire que ces valeurs ne doivent pas être éliminées, car au contraire, elles indiquent un sol compressible qu'on doit tenir compte pendant le choix de type de fondation et en étape de réalisation de l'ouvrage. Si pour d'autres paramètres, on rencontre des valeurs minimales tel que la densité, la cohésion, le frottement interne, ... etc. On doit prévoir d'autres problèmes géotechniques au niveau du sol tel que l'existence d'un sol lâche, l'existence d'un plan de cisaillement à un certain niveau de la profondeur investiguée etc.

2. Exemple 3 :

Dans l'exemple 3 intitulé par « Evaluation géostatistique des paramètres géotechniques des différents sols du Nord – Est algérien » réalisé en 2011 par S. KHALFAOUI, ce travail est subdivisé en deux parties, la première concerne l'analyse en composantes principales (ACP), là où nous remarquons que le chercheur à partir des corrélations, a établi un assemblage des paramètres géotechniques pour chaque âge géologique. A notre avis pour maintenir ces corrélations, au niveau d'une même formation de même âge, il faut un nombre très élevé des essais de laboratoire pour chaque paramètre à condition que les essais doivent être réalisés au niveau du même laboratoire pour éviter certaines sources d'incertitude, comme c'est déjà évoqué dans le chapitre 1 de notre travail. On remarque aussi que ces corrélations considèrent aussi les valeurs aberrantes que ce soit élevées ou minimales.

La deuxième partie de la recherche de S. Khalfaoui (2011), est consacrée à la caractérisation géostatistique des tassements des sols au Nord-Est Algérien, cette caractérisation consiste au crigeage et à l'élaboration des variogrammes pour les mêmes formations traitées par ACP dans la première partie. Nous constatons que la caractérisation prend comme variable régionalisée le tassement complet, par contre, elle ignore le tassement différentiel qui est le plus important en géotechnique, ce type de tassement se manifeste par des endommagements graves au niveau des constructions.

Nous concluons, en fin, que le traitement statistique et le choix des paramètres doit être effectué soigneusement pour ne pas négliger l'état critique du sol.

Conclusion :

A travers les exemples exposés ci-dessus, on remarque que le traitement statistique par différentes méthodes, la modélisation statistique ainsi que la géostatistique, constituent des outils performant pour la prévision des problèmes géotechniques rencontré dans les sols, surtout en cas où les essais de laboratoire sont lents et couteux. D'autre part, ces méthodes contribuent de manière considérable dans la prévision de la répartition et la variabilité des paramètres géotechniques que ce soit dans le temps ou dans l'espace. L'outil géostatistique peut avoir un effet considérable surtout pour la préparation des compagnes de reconnaissances géotechniques. Mais à condition d'effectuer le maximum d'essais sur un même sol, si les résultats d'essais existent déjà, elles doivent être complées pour éviter l'élimination de ceux qui sont élevées ou minimale. Le un choix des paramètres doit être donc effectué soigneusement pour ne pas négliger l'état critique du sol.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

D'après notre recherche on a tiré de considérables constatations.

Les erreurs et les incertitudes en géotechnique sont dues en général aux sols qui présentent une irrégularité et hétérogénéité naturelle à toutes les échelles (dans l'espace et dans le temps). Cette hétérogénéité qui est due à plusieurs facteurs déjà cités, est à l'origine des incertitudes gênantes dans les calculs et le dimensionnement des ouvrages.

L'analyse et la modélisation statistique constituent dans ce cas un puissant outil d'analyse surtout en cas où on possède un grand nombre de données quantitatives à traiter et à interpréter. Au fil des années, le développement des logiciels de plus en plus puissants et simples à utiliser, rend ce type d'analyse des données accessible aujourd'hui dans divers domaines. Ils permettent de mettre en relation des paramètres physiques, mécaniques et chimiques du sol et donc aboutir à des corrélations entre ces paramètres ; de ce fait des formules généralisables aux sols identiques du point de vue pétrographique ou géotechnique. Ces outils statistiques permettent aussi de décrire la variation naturelle des propriétés du sol, en augmentant l'efficacité de la reconnaissance géotechnique.

Les méthodes statistiques peuvent aider également à réduire les incertitudes passives et de modèles. L'absence de désordres sur le bâti et son environnement s'avoisinant est d'autant plus grande que la connaissance du site est complète (combinaison des différentes méthodes d'investigation), les imprévus sont alors peu nombreux et ceci par réduction des erreurs par le recours aux approches statistiques, probabilistes et géostatistiques. Si encore les effets induits par les modifications du site sont pris en compte le un modèle du sol sera le plus juste possible.

Donc l'obtention de résultats crédibles est conditionnée par la qualité et la quantité de l'information de départ, ainsi que par la localisation des points de mesure pour les méthodes statistiques.

Plusieurs recherches ont entamé ce type d'analyse, chacune selon ses objectifs. Dans ce travail, nous n'avons donné qu'un très bref aperçu sur ces recherches. Malgré les insuffisances cités dans notre critique pour les exemples exposés, on peut remarquer l'importance du traitement statistique par différentes méthodes, la modélisation statistique ainsi que la géostatistique à condition de bien choisir les paramètres à traiter. A travers les exemples exposés, on remarque l'importance du traitement statistique par différentes méthodes, la modélisation statistique ainsi que la géostatistique. Ces exemples, mettent en

évidence l'apport des méthodes statistiques en générale, pour la prévision des problèmes géotechniques rencontré dans les sols,. Comme elle contribuent de manière considérable dans la prévision de la variabilité des paramètres géotechniques que ce soit dans le temps ou dans l'espace. L'outil géostatistique peut avoir un effet considérable surtout pour la préparation des compagnes de reconnaissances géotechniques.

En fin on peut dire que notre modeste travail n'est qu'un début autant qu'initiation à la recherche. Il pourra être développé au futur, car le domaine d'application des méthodes statistiques en géotechnique est devenue très vaste là ni l'application, ni la recherche seront clôturées.

Référence bibliographiques

1. **Abdul Baki, A. ; Magnan, J.P., Pouget, P., 1993.** « Analyse probabiliste de la stabilité de deux remblais sur versant instable », Laboratoire centrale des ponts et chaussées, Paris.
2. **Amar S. Baguelin F. Jezequel J-F.(1973)** Utilisation des corrélations .Documents de la table ronde sur les corrélations des paramètres en mécanique des sols. Ecole centrale des Arts et Manufacture,Paris ,pp.I- 39 à I-44.
3. **Amar S. Jezequel J-F (1972)**, Essais en place et en laboratoire sur le sols cohérents.Comparaisons des résultats .Bull.liaison Labo.P. et ch.Paris, 58,12 pages.
4. **American Society For Testing And Materials, 1994**, Standard Practice for Thin-walled Tube Geotechnical Sampling of Soils, Designation : D 1587-94, Annual Book of ASTM Standards, Philadelphia, Pa
5. **Aoun Mounira,2016**«Caractérisation minéralogique,physique et cartographie des sols gonflants dans le bassin de Tébessa, Impact sur le plan d'aménagement.» Université Constantine 1 (ex Mentouri)
6. **Bacconnet, C., 1991.** Géostatistique et géotechnique. Application à la reconnaissance des sols.
7. **Buckingham E (1914)**On physically similar systems: illustrating the use of dimensional analysis. Phys Rev. 4, No. 4, 345–376
8. **Butterfield R (1999)** Dimensional analysis for geotechnical engineers. Geotechnique 49,No.3, 357–366.
9. **Buzzi O (2010)**On the use of dimensional analysis to predict swelling strain, Engineering Geology116-149-156.
10. **Buzzi O, Giacomini A, Fityus S (2010)**Towards a dimensionless description of soil swelling behaviour. Géotechnique. doi:10.1680/geot.7.00194.

11. **Benzecri, J. P. 1980.** L'analyse des données : La taxinomie. Dunod, 2ème édit. Paris. 632 p.
12. **Bolle, A. 2000.** Etude et prise en compte de la variabilité spatiale. Revue Française de Géotechnique. 93,55-66 pp.
13. **Claude Bouchu , 1969 .** Dominique Pepin. Claude Bouchu et le mot " statistique ". Journal de la Societe Française de Statistique, Societe Française de Statistique et Societe Mathematique de France, 2005, 146 (4), pp.119- 129. ffhal-00986920f
14. **Bouzenoune, A. and Rouvier H. and Thibiéroz J. 1995.** Trias de l'Ounza, contexte diapirique, zonationminéralogique et conséquences métallogéniques. Bull. Serv. Géol. Algérie. Vol. 6, N°1 pp 3-24.
15. **Chabane Kahina et Haret Leticia, 2020 :** Génération de la variabilité spatiale des paramètres mécaniques du remblai d'une digue, mémoire de Master, Univ. Mouloud Mammeri, Tizi Ouzou, 60p.
16. **Chiasson, P. et al. 1995.** Characterizing spatial variability of a clay by geostatistics. Revue Canadienne deGéotechnique, 32 (1), 1-10 pp.
17. **Chouabbi, A., 1987.** Etude géologique de la région de Hammam N'bails (SE de Guelma ; un secteur deszones externes de la chaîne Maghribides. Thèse troisième cycle. Université Toulouse 3, 123p.
18. **Cibois, P., 2006.** « Principe de l'analyse factorielle », note de cours : université de Versailles, Paris.
19. **Digabel , 2017.** Elodie Chapoulade. Optimisation de l'instrumentation pour le suivi et l'évaluation de l'état des alvéoles de strockage de déchets radioactifs. Génie civil. Université Clermont Auvergne [2017-2020], 2019. Français. ffNNT : 2019CLFAC049ff. fftel-02513165

20. **Dubost J., 2009** : Variabilité et incertitudes en géotechnique : de leur estimation à leur prise en compte. Thèse de Doctorat d'état en Mécanique et Ingénierie, Université Bordeaux I. 320 pages.
21. **Durand Delga, M. 1980.** Etude géologique de l'Ouest de la chaîne numidique (Thèse, Paris) Bull. Serv. Carte géol. Algérie, (2).; Stratigr., Description régionales, n° 24, 533 P., 143 fig., 16 pl. photo, 10 pl. h.t. Alger.
22. **Daksanamurthy V, Raman V (1973)** A simple method of identifying an expansive soil, Soil and Foundations, Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 13 (1), pp. 97–104
23. **Favre J.-L., 2000** - « Les incertitudes géologiques et géotechniques ». Risque et Génie civil, Paris. Presses des Ponts et Chaussées, p. 187-229.
24. **Favre J.-L., Touati K. (1995)** - « Probabilistic estimation of the errors in finite element calculation code for shallow foundation ». Proc. 7th Int. Conf. Applic. Stat. Prob, soils struct, eng.. Paris. A. A. Bakema, vol. 2, p. 1309-1315.
25. **Holtz R.D., et Kovacs W.D (traduit par Jean Lafleur), 1996** Introduction à la géotechnique Edition de l'École Polytechnique de Montréal.
26. **Holtz W G, Gibbs H J (1956)** Engineering properties of expansive clays, Transactions, ASCE, Vol. 121, pp. 641–677.
27. **Houmadi, Y., 2004.** « Modélisation stochastique de la variabilité spatiale des paramètres géotechniques », mémoire de magistère. Tlemcen : Faculté de technologie.
28. **Immediato, H., 2010.** « Cours statistiques », note de cours : Lyon : Université Claude Bernard de Lyon.
29. **Jean-Marie Helbling ; 2018.** «MATH 444 – Statistique multivariée» VERSION DU 2 MAI 2018 HIVER 2015 ET 2016, EPFL

30. **J. P. Benzécri, 1976.** « Histoire et préhistoire de l'analyse des données. »Partie III Era piscatoria Les cahiers de l'analyse des données, tome 1, no 3 (1976), p. 221-241.
31. **J.-L Favre École centrale de Paris 92295 Châtenay-Malabry.** «Les différents types d'erreurs et leur prise en compte dans les calculs géotechniques»
32. **Jérôme Pagès ; 2013.** «Analyse factorielle multiple avec R » Les Ulis: EDP Sciences, 2021, pp. 65-76.
33. **Khalifaoui, S .2008.**, Evaluation géostatistique des paramètres géotechniques des sols du Nord- Est algérien.Thèse Doctorat, Université Badji Mokhtar Annaba – Algérie.
34. **Khalifaoui, S. et al. 2005.** Evaluation géostatistique de la maille de reconnaissance géotechnique del'aérodrome de Batna (N-E algérien). Article publié au niveau de la revue
35. **Kowalski, W. 2001.** Paléogéographie du Miocène des environs d'El (Nord de Tebessa). Bull. Serv. Géol.Algérie.
36. **Magnan J.P., 2000:** Les quelques spécificités du problème d'incertitude en Géotechnique, Revue Française de Géotechnique RFG, N° 93, 4eme trimestre 2000, PP, 03-10.
37. **Mahdavi C ;1985 :** Analyse probabiliste du comportement des sols et des ouvrages. Evaluation des risques dans les études géotechniques de tracés de remblais sur sols mous.
38. **Marache, A. and Riss J. Gentier S. and Chilès J.-P. 2002.** Characterisation and reconstruction of a rockfracture surface by geostatistics. International Journal for Numerical
39. **Mathéron, G., 1962a.** Traité de géostatistique appliquée. Mém. B.R.G.M.,14, Tome I. 333p.
40. **Mathéron, G., 1962b.** Traité de géostatistique appliquée.Mém. B.R.G.M.,14, Tome II. 306p.
41. **Maxime Cauvin.** «Prise en compte des incertitudes et calcul de probabilité dans les études de risques liés au sol et au sous-sol». Autre. Institut National Polytechnique de Lorraine, 2007. Français
42. **Megnounif Imène ; 2013 ;** «ANALYSE DES DONNEES EN GEOTECHNIQUE POUR LE DIMENSIONNEMENT DES OUVRAGES CAS DE L4AEROPORT

D'ALGER» Université AboubakrBelkaid ,Faculté de technologie, Département de Génie Civil.

43. **Mezghache, H., 1989.** 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. 178 p.
44. **Ministère Du Développement Durable, DE L'ENVIRONNEMENT ET DES PARCS DU QUÉBEC,** Guide d'échantillonnage à des fins d'analyses environnementales : Cahier 5 – Échantillonnage des sols, Québec, Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec, Édition courante, ÉDITION : Août 2008 Révisé : 5 février 2010 , p 42-44
45. **Moussouteguy N ; 2002 :** utilisation combinée des essais pressiométriques et diagraphies instantanées pour mieux évaluer le risque géotechnique en reconnaissance des sols, Thèse de Doctorat en Mécanique, Ecole doctorale de Mécanique, Université Bordeaux I. 235 pages.
46. **Nancy Salloum.** Evaluation de la variabilité spatiale des paramètres géotechnique du sol à partir de mesures géophysiques : application à la plaine alluviale de Nahr-Beyrouth (Liban). Sciences de la Terre. Université Grenoble Alpes; Université Libanaise, 2015. Français. ffNNT : 2015GREAU014ff. fftel-01279224
47. **Philipponnat G ; Hubert B ;2002 :** Fondations et ouvrages en terre, Eyrolles, Paris, 548 pages.
48. **Rao, J.N.K., Wu, C.F.J. et Yue K. 1992.** « Quelques travaux récents sur les méthodes de rééchantillonnage applicables aux enquêtes complexes », Techniques d'enquête, 18(2), p. 225-234 (Statistique Canada, No 12-001 au catalogue).
49. **Sowers G F, Kennedy C M (1967)** High volume change clays of the South-Eastern coasta plain: Proc.3rd Pan Am. Conf. Soil Mechanics Foundation Engng, Caracas, Venezuela pp. 99-120.
50. **Utilisation De La Statistique Descriptive En Géotechnique .** M. CASSAN S. A. Fondasol Études BP 767 84035 Avignon Cedex 3.
51. **Van Der Merwe D. H (1964)** The Prediction of heave from the Plasticity Index and percentage Clay Fraction of Soils, Civil Engineers in south Africa, 6(6):pp 103-107.
52. **Volle, M., 1981.** Analyses des données. Edit. Economica; Paris. 317 p.