

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE SAAD DAHLEB – BLIDA1



FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL

MEMOIRE DE MASTER

Spécialité : Géotechnique

En vue de l'obtention du diplôme de Master en Génie Civil

THEME :

**MODELISATION PAR METHODES STATISTIQUES DES
PARAMETRES MECANQUES DES SOLS ARGILEUX DE LA
REGION D'ALGER.**

Présenté par :

- BOUGHALIA MOHAMMED IMED EDDINE
- BOUGUEDOURA ABDERRAHMANE

Encadré par :
Dr. BELKACEMI SOUAD

2022/2023

REMERCIEMENTS

Toute notre gratitude et remerciements vont à, ALLAH le tout puissant pour nous avoir gardé en bonne santé et nous avoir donné force, patience, courage et volonté pour bien mener et achever ce modeste travail.

Nos remerciements les plus chaleureux et affectueux vont aussi à nos chers parents, qui nous soutiennent, et aident et de nous encourager à aller le plus loin possible dans nos études.

*Au terme de ce travail nous remercions **Mme. BELKACEMI .SOUAD** pour avoir accepté de diriger ce travail qui nous a aidé pour la finalisation de notre mémoire.*

*Nous remercions très sincèrement **Mr. BENDIMA** Mohamed, Ingénieure à Cosider, pour nous avoir partagé ses connaissances et son intérêt qui a été pour nous une grande contribution intellectuelle et aussi morale.*

Nous tenons à remercier l'ensemble des enseignants de l'université Saad Dahlab de BLIDA .

Enfin un grand merci aux membres du jury qui ont accepté d'évaluer notre travail.

Résumé

Peu importe l'ampleur de l'étude géotechnique, 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

Etude géotechnique, variabilité des sols, méthodes statistiques, ACP, régression linéaire

Abstract

Regardless of the extent of the geotechnical study, the variations of the physical and mechanical properties from one point to another create uncertainties on the representative values of the calculation parameters, which results in uncertainties in the prediction. 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 analysis, Soil variability, statistical methods, PCA, linear regression

ملخص

بغض النظر عن مدى الدراسة الجيوتقنية للتربة, فإن الإختلافات في الخواص الفيزيائية و الميكانيكية من نقطة إلى اخري تخلق مع ذلك شكوكاً حول القيم التمثيلية لمعلومات الحساب , مما يؤدي إلى عدم اليقين في التنبؤ . سلوك الهياكل, لأن أخذ الجيوتقنية عدة العينات الجيوتقنية بشكل عام غالباً ما يكون محدوداً و مجزئاً . يمكن أن يكون لعدم اليقين في التقنيات مصادر

اختيار موقع الآبار , و الاخطاء في التعامل مع الاختبارات المعملية و تفسير البيانات, و إعادة صياغة العينات المخبرية (الأساسية) , و ما إلى ذلك. و على الرغم من تطوير طرق حساب رقمية أكثر كفاءة و وصف التربة الذي يقترب بشكل متزايد مع الواقع , لا تزال هناك فجوة بين نتائج الحساب و القيم الحقيقية , لحل هذه المشكلة , يبحث المهندس الجيوتقني دائماً عن تقنيات مختلفة مثل التحليل الإحصائي , و الذي يهدف إلى مراعاة تأثير تباين الخصائص الفيزيائية و الميكانيكية للتربة في الحسابات المختلفة لميكانيكية التربة ضروري لاستقرار الهيكل. سيقدم هذا العمل وصفاً للطرق الاحصائية المستخدمة في الدراسة الجيوتقنية للتربة

الكلمات المفتاحية : الدراسة الجيوتقنية , معالجة الأخطاء , الطرق الرقمية , حل المشكلات , التحليل الإحصائي

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS

RESUME

ABSTRACT

ملخص

TABLE DES MATIÈRES

LISTE DES FIGURES

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES SYMBOLES

<u>CHAPITRE I</u> INTRODUCTION GENERALE	12
1.1 Presentation du projet.....	14
<u>CHAPITRE II</u> ANALYSE STATISTIQUE DE LA VARIABILITE DES PARAMETRES GEOTECHNIQUES.....	16
2.1. Introduction.....	17
2.2.Statistiques et probabilités en mécanique des sols.....	17
2.2.1. Importance des méthodes statistiques.....	18
2.3.Statistique descriptive.....	18
2.4. Corrélations – généralités.....	19
2.4.1 Origine des relations et corrélations dans les sols.....	19
2.4.2 Domaines d'utilisation des corrélations.....	20
2.5.Regression linéaire simple et multiple et prévision des paramètres Mécaniques.....	21
2.6. Quantification de la variabilité des propriétés du sol dans la littérature.....	22
2.6.1. Coefficient de variation.....	22
2.6.2. Lois de distribution des propriétés des sols.....	27
2.6.3. Corrélations.....	28
2.7. Analyse en composantes principales.....	31
. 2.7.1 Principe de l'acp.....	31
. 2.7.2. Les points qui nous intéressent.....	31
2.8. CONCLUSION.....	33
<u>CHAPITRE III</u> RECONNAISSANCES GEOTECHNIQUES	34
3.1. Introduction.....	35

3.2. Compagnes de prospection et reconnaissance geotechnique.....	35
3.3. Contexte geologique.....	42
3.3.1. zone i – Centre des affaires.....	42
3.3.2 . zone ii – Puits de ventilations 09.....	43
3.3.3. zone III –Station aeroport international.....	44
3.3.4 zone IV – Puits de ventilation 10.....	45
3.4. Essais Geotechniquesde laboratoire.....	46
3.4.1. zone I – Centre des affaires.....	46
3.4.2. zone II – Puits de ventilation 9.....	47
3.4.3. zone III – Station aeroport.....	47
3.4.4. zone IV – Puits de ventilation 10.....	48
3.5. Classificationgeotechnique des sols.....	49
3.5.1.zone I – Centre des affaires.....	49
3.5.2. zone II – Puits de ventilation 9.....	52
3.5.3. zoneIII – Station aeroport.....	54
3.5.4. zone IV – Puits de ventilation 10.....	57
3.6. Conclusion.....	58
CHAPITRE IV MODELISATION PAR REGRESSION DES PARAMETRES MECANIQUES DU SOL ARGILEUX.....	59
4.1. Introduction.....	60
4.2. Méthode d’étude	60
4.3. Distributions des valeurs des paramètres physiques et mécaniques	61
4.4. Statistiques descriptives, distributions et tests de conformité.....	61
4.4.1. Corrélations entre paramètres géotechniques.....	68
4.5.Analyse en composantes principales des paramètres géotechniques.....	72
4.5.1. Résultats de l’acp.....	73
4.6. Modelisation par regression multiple des parametres mecaniques.....	77
4.7.Conclusion.....	81
CHAPITRE V CONCLUSION GENERALE.....	82
Listes des references.....	85

LES ANNEXES :

- ANNEXE A
- ANNEXE B
- ANNEXE C

- LISTE DES FIGURES -

CHAPITRE I: INTRODUCTION GENERALE

Figure 1.1 : Extensions du Métro EL Harrach Centre - Aéroport international d'Alger.....14

CHAPITRE II: ANALYSE STATISTIQUE DE LA VARIABILITE DES PARAMETRES GEOTECHNIQUES

Figure 2.1: Classification de Pearson (Baecher et Christian, 2003)27

Figure 2.2 : variables quantitatives32

Figure 2.3 : représentation des variables dans un plan factoriel- Cercle de corrélations32

CHAPITRE III : RECONNAISSANCES GEOTECHNIQUES

Figure 3.1 : les quatre zones du tronçon de la ligne de métro considéré35

Figure 3.2 ; emplacement Des sondages Dans la Zone I (Station centre des affaires).....38

Figure 3.3 : emplacement Des sondages Dans la Zone II (PV9)39

Figure 3.4 : emplacement Des sondages Dans la Zone III (Station Aéroport international).....40

Figure 3.5 : emplacement Des sondages Dans la Zone IV (pv10)41

Figure 3.6 : Schéma représentant les horizons géologiques au niveau de la Zone I42

Figure 3.7 : Schéma représentant les Horizons géologiques au niveau de la Zone II43

Figure 3.8 : Schéma représentant les Horizons géologiques au niveau de la Zone III.....44

Figure 3.9 : Schéma représent les Horizon des couche de zone IV.....45

CHAPITRE IV : MODELISATION PAR REGRESSION DES PARAMETRES MECANIQUES DU SOL ARGILEUX

Figure 4.1 : Distributions des paramètres géotechniques et modèles de lois répondant aux tests de conformité – Argile peu plastique (Ap)63

Figure 4.2 : Distributions des paramètres géotechniques modèles de lois répondant aux tests de conformité – Argile Très plastique (At)66

Figure 4.3 : Nuages de points de quelques couples de propriétés physiques et leurs coefficients de détermination R^2 70

Figure 4.4 : Nuages de points de quelques couples de paramètres mécaniques et physiques et leurs

coefficients de corrélation R de Pearson	71
Figure 4.5 : Diagramme "Scree plot",- valeurs propres en fonction du nombre de composantes principales	74
Figure 4.6 : Représentation des individus et des variables de base sur le biplot factoriel 1-2.....	75
Figure 4.7 : Représentation des variables de base sur le cercle de corrélation	76
Figure 4.8 : Nuages de points des résidus pour la relation entre les paramètres mécaniques et les paramètres physiques déterminants.....	80

CHAPITRE V : CONCLUSION GENERALE

- LISTE DES TABLEAUX -

CHAPITRE I : INTRODUCTION GENERALE

CHAPITRE II : ANALYSE STATISTIQUE DE LA VARIABILITE DES PARAMETRES GEOTECHNIQUES

Tableau 2.1 : coefficients de variation pour l'essai technique du sol (Lee et al. 1983).....	23
Tableau 2.2 : Coefficients de variation des différentes propriétés du sol pour les données de synthèse de (a) Lacasse et Nadim (1996) et (b) Lumb (1974).....	24
Tableau 2.3 : Valeurs représentatives de la variabilité des paramètres de consolidation, exprimé en coefficient de variation en pourcentage	25
Tableau 2.4 : Variabilité de ϕ mesuré au laboratoire pour différents sols	25
Tableau 2.5 : Variabilités des mesures en laboratoire pour cinq (5) dépôts de résidus miniers (Baecher et al, 1983).....	26
Tableau 2.6 : analyse statistique des tests de sol effectués sur des échantillons de sol identiques distribués par le conseil américain des essais indépendants de laboratoire (Hammitt 1966)	26
Tableau 2.7 : Matrice de Corrélacion entre les propriétés (Holtz and Krizek 1971).....	29

CHAPITRE III : RECONNAISSANCES GEOTECHNIQUES

Tableau 3.1 : les sondages réalisés dans Zone I	36
Tableau 3.2 : les sondages réalisés dans Zone II	36
Tableau 3.3 : les sondages réalisés dans Zone III	37
Tableau 3.4 : les sondages réalisés dans Zone IV	37
Tableau 3.5 : Résumé facies existantes dans la zone I et leurs profondeurs	42
Tableau 3.6 : Résumé des profondeurs facies existantes Dans zone II	43
Tableau 3.7 : Résume des profondeurs des facies existantes dans zone III.....	44
Tableau 3.8 : Résume des profondeurs des facies existantes dans zone IV	45
Tableau 3.9 : Résume des essais en laboratoires de la zone I	46

Tableau 3.10 : Résumé des essais en laboratoires de la zone II	47
Tableau 3.11 : Résumé des essais en laboratoires de la zone III	47
Tableau 3.12 : Résumé des essais en laboratoires de la zone IV	48
Tableau 3.13 : Résultats de l'analyse granulométrique S46	49
Tableau 3.14 : Résultats de l'analyse granulométrique Sc73	49
Tableau 3.15 : Résultats de l'analyse granulométrique SC74	50
Tableau 3.16 : Résultats de l'analyse granulométrique SC75	50
Tableau 3.17 : Résultats de l'analyse granulométrique SC76	50
Tableau 3.18 : Résultats de l'analyse granulométrique SC77	51
Tableau 3.19 : Résultats de l'analyse granulométrique SC78	51
Tableau 3.20 : Résultats de l'analyse granulométrique SC79	51
Tableau 3.21 : Résultats de l'analyse granulométrique S43	52
Tableau 3.22 : Résultats de l'analyse granulométrique S45	52
Tableau 3.23 : Résultats de l'analyse granulométrique SC80	52
Tableau 3.24 : Résultats de l'analyse granulométrique SC81	53
Tableau 3.25 : Résultats de l'analyse granulométrique SC82	53
Tableau 3.26 : Résultats de l'analyse granulométrique SC83	54
Tableau 3.27 : Résultats de l'analyse granulométrique Sc84	54
Tableau 3.28 : Résultats de l'analyse granulométrique S46	54
Tableau 3.29 : Résultats de l'analyse granulométrique S47	55
Tableau 3.30 : Résultats de l'analyse granulométrique SC85	55
Tableau 3.31 : Résultats de l'analyse granulométrique SC86	55
Tableau 3.32 : Résultats de l'analyse granulométrique SC87	56
Tableau 3.33 : Résultats de l'analyse granulométrique SC88	56
Tableau 3.34 : Résultats de l'analyse granulométrique SC89	56

Tableau 3.35 : Résultats de l'analyse granulométrique SC93	57
Tableau 3.36 : Résultats de l'analyse granulométrique SC94	57
Tableau 3.37 : Résultats de l'analyse granulométrique SC95	57
Tableau 3.38 : Résultats de l'analyse granulométrique SC 97	58
Tableau 3.39 : Résultats de l'analyse granulométrique SC98	58

CHAPITRE IV : MODELISATION PAR REGRESSION DES PARAMETRES MECANIQUES DU SOL ARGILEUX

Tableau 4.1 : Statistiques descriptives des propriétés physiques et paramètres Mécaniques de l'argile peu plastique	62
Tableau 4.2 : Statistiques descriptives des propriétés physiques et paramètres mécaniques de l'argile Très plastique	65
Tableau 4.3 : Matrice des coefficients de corrélation de Pearson R associés aux paramètres géotechniques du sol argileux	69
Tableau 4.4 : Valeurs propres de la matrice des corrélations	74
Tableau 4.5 : Matrice des corrélations entre les variables (en listwise)	76
Tableau 4.6 : Tableau des inerties	77
Tableau 4.7 : Tableau des vecteurs propres	77
Tableau 4.8 : Relations par régression multiple entre les paramètres mécaniques et les paramètres physiques déterminants.....	78

CHAPITRE V; CONCLUSION GENERALE

- LISTE DES SYMBOLES -

C : cohésion.

C' : La cohésion effective à partir d'un essai CU au triaxial

φ' : L'angle de frottement effectif à partir d'un essai CU au triaxial

C_c : L'indice de compression vièrge

C_g : L'indice de recompression (de gonflement)

A_p : Sol argileux peu plastique

A_t : Sol argileux très plastique

$< 2\mu\text{m}$: Le pourcentage des éléments inférieurs à $2\mu\text{m}$ (particules d'argile)

ω : Teneur en eau naturelle

ω_L : Limite de liquidité

ω_p : Limite de plasticité

I_p : Indice de plasticité

γ_s : Le poids volumique des grains solides

γ_h : Le poids volumique humide

γ_d : Le poids volumique sec

S_r : Le degré de saturation

P_c : La pression de préconsolidation

q_u : La résistance à compression simple

β_1 : Coefficient d'asymétrie

β_2 : Coefficient d'aplatissement

Cov : Coefficient de Variation

R : le coefficient de corrélation

R^2 : Le coefficient de détermination

CHAPITRE I : INTRODUCTION GENERALE

Les sols sont des milieux hétérogènes, ils se différencient par la forme, les dimensions des particules ou des agrégats de particules, par l'existence de vides, de zone plus dense. L'hétérogénéité est due principalement aux processus de formation de ces sols et 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 (Baecher et Christian, 2003) .

Cette variabilité naturelle a des conséquences sur les propriétés physiques et mécaniques des sols. A cet effet, la dispersion des propriétés géotechniques des sols est un problème que doit inévitablement traiter l'ingénieur géotechnicien dans la pratique courante géotechnique (Baguelin et Kovarik, 2000).

Les paramètres utilisés pour décrire les propriétés physiques et mécaniques sont de nature très variée :

- paramètres d'identification et d'état (porosité, indice des vides, densité, densité relative, limites d'Atterberg, etc.) .
- paramètres de déformabilité (indices de compression et de gonflement, module œdométrique, module pressiométrique, etc.) .
- paramètres de résistance (cohésion et angle de frottement interne, pression limite pressiométrique, résistance de cône statique ou dynamique, etc.) .
- paramètres de perméabilité .

Pour la reconnaissance géotechnique des sols, il est très rare que, sur un même site, tous les paramètres géotechniques du sol (paramètres physiques, mécaniques et chimiques) soient mesurés en un nombre de points suffisant pour que l'on puisse juger bien l'ensemble du massif de sol. De manière habituelle, la reconnaissance géotechnique se limite au strict minimum, et l'on dispose alors, des valeurs de certains paramètres en certains points et d'autres paramètres en d'autres points. 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.

Toute fois les méthodes de calcul de la mécanique des sols reposent toutes sur des hypothèses simplificatrices. Ces hypothèses ignorent généralement le caractère hétérogène des sols naturels. La variation d'un point à un autre des propriétés physiques et mécaniques du sol à l'intérieur des couches retenues pour ces calculs, est pourtant, une source d'incertitude sur le comportement prévu des ouvrages (J.P.Magnan, 1993). Malgré le développement des méthodes numériques pour des calculs de plus en plus performants et la description la plus réaliste possible du sol, l'écart entre les résultats de calcul et les valeurs réelles n'est pas exclue. Ainsi, les géotechniciens cherchent à minimiser ce biais existant en poussant leurs investigations dans l'application des méthodes et des techniques diverses. Parmi ces techniques on peut citer les analyses statistiques et les probabilités, dont le but est de prendre en compte l'effet de la variabilité des propriétés géotechniques des sols.

Dans la littérature, plusieurs relations ont été proposées, basées principalement sur les méthodes de : l'œdomètre, triaxial, succion (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 ; Hashim et Suleman, 2012 ; ... et d'autres). Les paramètres choisis et les résultats acquis diffèrent d'une recherche à l'autre. Cependant l'initiative principale reste toujours, la recherche d'une méthode d'estimation rapide d'un paramètre pouvant être difficilement déterminé au laboratoire, en fonction d'autres faciles et moins coûteux.

1. Présentation du projet

La réalisation du métro d'Alger sur un itinéraire allant de Bab el oued à l'Aéroport international avec plusieurs extensions totalisant une ligne de 64 km est un projet d'envergure qui a nécessité pour son étude et sa réalisation des dizaines de campagnes d'investigation et de reconnaissance sur une bonne partie du sous-sol d'Alger, à l'issue desquelles des centaines de rapports géotechniques ont été établis. L'objectif de notre travail est de tenter d'exploiter quelques-uns de ces résultats d'investigations géotechniques pour caractériser les sols présents sous un tronçon de la ligne de métro.

L'extension de la ligne 1 du métro d'Alger reliant le Centre-ville d'El Harrach à l'Aéroport International Houari Boumediene sur un linéaire de 10 km est en cours de réalisation. L'extension comporte 10 puits de ventilation et 9 stations. Cette ligne desservira des quartiers denses en population tel que : Beaulieu, Oued Smar, Cité 5 juillet, Bab Ezzouar, le pôle universitaire d'El Harrach, le Centre des Affaires de Bab-Ezzouar et l'université Houari Boumediene. Elle relira le Tramway au carrefour de l'université Houari Boumediene et Offrira une multi modalité au niveau de cette station. Le Maître d'ouvrage Entreprise Métro d'Alger (EMA) et la Maîtrise d'œuvre DES (DONGMYEONG, Euro studios, SAETI) ; Cosider Travaux Publics TP M28 .

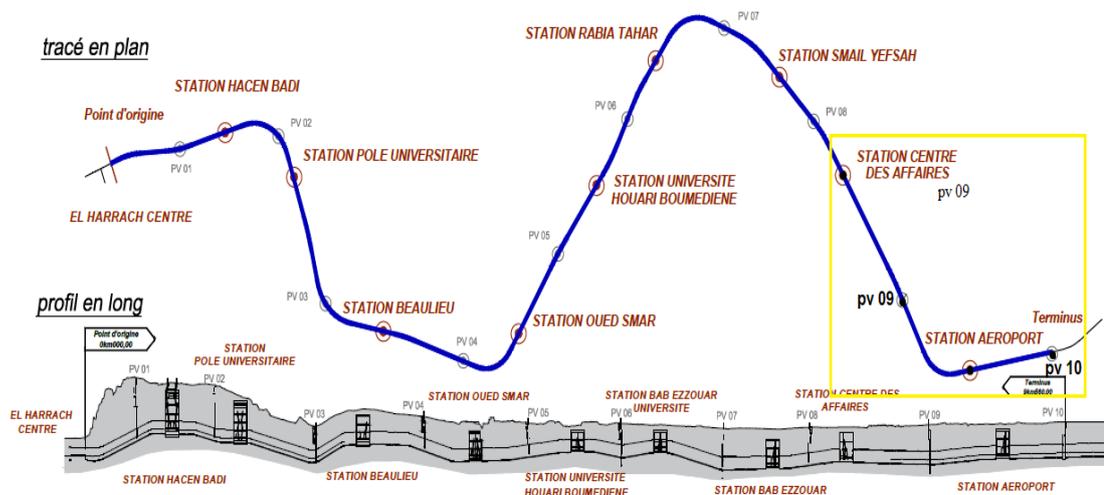


Figure 1.1 : Extensions du Métro EL Harrach Centre - Aéroport international d'Alger

Le tronçon qui a fait l'objet de la présente étude est la zone de la ligne qui s'étend de Bab Ezzouar jusqu'à DAR EL BEIDA représentée dans la Figure 1.1 Sur un linéaire de 2.8 Km qui contient deux stations et deux puits de ventilation (station centre des Affaires et station Aéroport international ; puits de ventilation 9 et puits de ventilation 10). Cette zone est caractérisée par prédominance argileuse, mise en évidence par les campagnes géotechniques composées de sondages carottés et d'essais pénétrométriques, comme nous allons le voir dans le chapitre 3.

Le chapitre 2 donne quelques éléments et autres notions de ce qu'il est obligatoire de maîtriser si l'on veut aller au bout de notre projet : les notions de statistiques et probabilités. Celles-ci sont une façon pénétrer l'inconnu qui découle de l'hétérogénéité des sols en termes de l'incertitude qui affecte l'estimation des paramètres de calculs. La technique statistique utilisée dans ce type d'approche et qui reste la plus populaire et la plus performante est évoquée et détaillée au chapitre 2.

Le chapitre 3 analyse les résultats des reconnaissances géologique, hydrogéologique et géotechnique et aboutit à l'établissement d'une synthèse de tous les paramètres géotechniques issus d'essais d'identification physiques et essais mécaniques au laboratoire, ce qui servira de base de données pour l'application des méthodes statistiques au chapitre suivant.

Dans la pratique du génie civil et particulièrement de la mécanique des sols, les corrélations entre paramètres sont utilisées comme moyen de contrôle des résultats des essais en place et en laboratoire, et comme moyen de fabrication de valeurs complémentaires de certains paramètres en fonction des autres. Ces méthodes statistiques très utiles dans la recherche de la description de la variabilité des sols, sont appliquées, à ces fins, dans le chapitre 4.

Enfin ce travail réalisé dans le cadre de la préparation d'un mémoire de master se termine par une conclusion.

CHAPITRE II : ANALYSE STATISTIQUE
DE LA VARIABILITE DE PARAMETRES
GEOTECHNIQUES

2.1. 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 liée essentiellement à la stabilité du site et par conséquent à la sécurité de l'ouvrage.

Même si le budget le permet, il ne faut pas épuiser et remanier tous les sols pour le futur ouvrage, 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.

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.

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

2.2. STATISTIQUES ET PROBABILITES EN MECANIQUE DES SOLS

Le développement des méthodes statistiques et probabilistes en mécanique des sols est dû à :

- 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 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 et ainsi élaborer des modèles statistiques faciles à être généralisés et utilisés.

Les méthodes statistiques sont utilisées dans 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 (Baecheret Christian, 2003).
- Rendre la reconnaissance géotechnique plus efficace, car celle 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 fait que les méthodes de détermination de ces propriétés sont plus ou moins rapides que certains essais longs et complexes (Baecher et Christian, 2003). 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 devenues très applicables dans le domaine de la géotechnique, mais il reste encore des techniques d'analyse moins exploitées ou en cours d'étude.

2.2.1. Importance des méthodes statistiques

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.

2.3. STATISTIQUE DESCRIPTIVE

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, chimique et même minéralogiques) qui sont exprimés par des valeurs numériques. La statistique permet de traduire ces valeurs numériques en informations utiles pour la réalisation du projet. 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.). Les statistiques élémentaires des données géotechniques comprennent les indicateurs statistiques suivants : les indicateurs de tendance (la moyenne, le mode), les indicateurs de dispersion (les valeurs minimale et maximale, l'écart type et le coefficient de variation) et enfin les indicateurs de forme (coefficients d'asymétrie « skewness » et d'aplatissement « kurtosis ») qui sont aussi représentés. L'histogramme donnera également une image de la variation de chaque paramètre. Ce dénombrement élémentaire et descriptif, permet une présentation claire pour la distribution des paramètres du point de vue statistique.
- 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.

Les détails pour le calcul de ces statistiques est donné en annexe A

2.4. CORRÉLATIONS – GÉNÉRALITÉS

2.4.1 Origine des relations et corrélations dans les sols

S'il est difficile, voire impossible, de donner une justification théorique quantitative de l'existence de relations entre les propriétés d'un même massif de sol naturel, il est facile d'admettre que les différents paramètres d'un sol doivent avoir des relations entre elles telles que :

la résistance au cisaillement, la plasticité ou la perméabilité, le tout dépendent de la forme et de la nature des particules, et aussi de la quantité d'eau présente dans les interstices.

De plus, à l'intérieur d'une même catégorie de paramètres, il existe à l'évidence des relations entre les paramètres mesurés par des essais in situ ou au laboratoire. Et si deux paramètres dépendent, l'une des mêmes propriétés physiques que l'autre, alors il existe également une relation entre ces deux paramètres (Magnan, 1982).

Cette réflexion purement qualitative est confirmée par l'expérience : il existe effectivement, dans chaque dépôt de sol, des relations entre les paramètres géotechniques, ainsi que des relations plus générales, valables pour un type de sol, ou même pour plusieurs types de sols. Si l'on poursuit l'analyse des relations qui peuvent exister entre les propriétés géotechniques d'un sol, on est conduit à distinguer trois types de relations :

- **les relations mathématiques exactes**, qui existent par exemple entre les paramètres décrivant l'état du sol. On peut illustrer ce type de relations par toutes les formules mathématiques reliant

- L'indice des vides e et la porosité n :

$$e = n/(1 - n) \quad (2.1)$$

- La teneur en eau w , le poids volumique du sol γ et le poids volumique du sol sec γ_d :

$$\gamma = \gamma_d (1 + w) \quad (2.2)$$

- La teneur en eau w , l'indice des vides e , le degré de saturation S_r et le poids spécifique des grains solides :

$$G_s \cdot \omega = S_r \cdot e \quad (2.3)$$

- Les poids volumiques γ , γ_d , γ_s et γ_w d'un sol saturé :

$$\gamma = (\gamma_s \gamma_w + \gamma_s \gamma_d - \gamma_d \gamma_w) / \gamma_s \quad (2.4)$$

- etc. ;

- **Les lois d'évolution en fonction de la profondeur**, dues à l'effet de la pesanteur et dont l'origine est liée à l'augmentation des contraintes quand on s'enfonce dans le sol. Par exemple, dans les dépôts homogènes de sols fins dont l'état s'est stabilisé, les contraintes effectives, pressions de préconsolidation, modules et résistances augmentent avec la profondeur ;

- **Les relations empiriques (ou corrélations)** entre propriétés d'un même volume élémentaire de sol, par exemple la porosité et le coefficient de perméabilité, l'indice de densité d'un sable et son angle de frottement interne, la pression de préconsolidation et la cohésion non drainée d'une argile, etc. Ces relations, qu'il n'est possible de caractériser que de façon statistique, s'expliquent par la raison déjà citée que toutes les propriétés d'un même empilement de particules évoluent de façon coordonnée et traduisent l'existence d'une loi de comportement générale pour chaque grande classe de sol.

2.4.2 Domaines d'utilisation des corrélations

Dans la pratique de la mécanique des sols, les corrélations entre paramètres sont utilisées comme moyen de contrôle des résultats des essais en place et en laboratoire, et comme moyen de fabrication de valeurs complémentaires de certains paramètres en fonction des autres. Par exemple, sur un site donné, on peut analyser la relation entre deux paramètres mesurés sur une même carotte de sol (indice des vides e et indice de compression C_c , etc.) ou mesurés en place dans le même essai (module pressiométrique EM et pression limite pressiométrique, etc.) et détecter les variations de la nature ou de l'histoire des sols d'après

les modifications de leurs relations. Dans un tel cas, les corrélations servent d'outil de contrôle de l'homogénéité des sols (ou de la qualité des essais, si l'on sait de façon certaine que le sol est le même que celui qui a servi à établir la corrélation).

D'autre part, les corrélations sont aussi utilisées pour estimer certains paramètres de sols (souvent, des paramètres mécaniques) en fonction des caractéristiques qui ont été mesurées (souvent, des propriétés physiques, comme la densité ou la teneur en eau). On peut ainsi, lors des études préliminaires et dans certaines situations de projets, disposer de valeurs des paramètres nécessaires au dimensionnement des ouvrages sans les avoir déterminées par des essais. Les conditions d'utilisation de corrélations dans les études géotechniques dépendent de la fiabilité des corrélations utilisées.

Les erreurs expérimentales exercent également une influence sur la qualité des corrélations. Donc, il est indispensable de connaître l'origine des corrélations que l'on envisage à utiliser et d'être clair concernant la variabilité des paramètres autour de leur relation moyenne affichée. Pour étudier les relations entre les propriétés des sols, on utilise des techniques classiques de la statistique. En mécanique des sols, en appliquant ces techniques, chaque paramètre géotechnique doit être considéré comme une variable aléatoire, c'est-à-dire comme une grandeur non déterminée et dont on sait qu'elle peut prendre telle ou telle valeur parmi un ensemble de valeurs possibles, avec une certaine probabilité. Cette assimilation des propriétés du sol à des variables aléatoires représente l'ignorance de l'ingénieur vis-à-vis des valeurs exactes de chaque propriété en chaque point.

2.5. REGRESSION LINEAIRE SIMPLE ET MULTIPLE ET PREVISION DES PARAMETRES MECANIQUES

La régression linéaire simple 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 (Benjamin et Cornell, 1970). Dans le cas des sols étudiés, la régression est représentée par un nuage de point exprimant le taux de corrélation des différents paramètres géotechniques choisis. Chaque nuage de point est ajusté à une droite d'équation

$$Y = a X + b \quad (2.5)$$

La droite est également jointe du coefficient de corrélation.

La régression linéaire multiple n'est que l'extension du modèle à deux variables exposé ci-dessus (en régression linéaire simple). Elle 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.

$$Y = a_0 + a_1 X_1 + a_2 X_2 + \dots + a_p X_p \quad (2.6)$$

Où : a_0 est l'ordonnée à l'origine, c'est une constante appelée intercept.

- a_1, a_2, a_p : sont les coefficients de régression des prédicteurs X_1, X_2, X_p .

2.6. QUANTIFICATION DE LA VARIABILITE DES PROPRIETES DU SOL DANS LA LITTERATURE

2.6.1. Coefficient de variation

Le coefficient de variation (COV), obtenu en divisant l'écart type par la moyenne de la variable, est couramment utilisé dans la quantification en géotechnique car il fournit une mesure significative de la dispersion relative des données autour de la moyenne.

Les études reportées dans la littérature ont montré que chaque propriété du sol peut suivre des distributions de probabilité et un coefficient de variation différent suivant les sites (le type des tests, le type de sol...). Par exemple Phoon et Kulhawy (1999), ont fait une campagne d'essais intensives pour connaître l'intervalle du coefficient de variation (COV) pour les paramètres de sol à partir des essais in situ (*CPT, SPT, Vane Shear Test...*) et de laboratoire (essais triaxiaux *C.D., U.U., C.U.*) et ils ont trouvé que le COV de la résistance à la compression simple q_u d'argile varie entre 4 % et 56 % (en moyenne 30 %), le COV de la tangente de l'angle de frottement $\tan(\varphi)$ d'un sol à grains fins varie entre 6% et 46 %, et celui de la résistance de pointe (q_c) du sable varie entre 10 % et 81 % et de l'argile entre 5 % et 40 % tandis que celui de qt , résistance à la pointe du *CPT* corrigé varie entre 2 % et 17 %.

Kulhawy et *al.*, 1991 ont estimé les coefficients de variation des propriétés physiques du sol (teneur en eau ω , limite de liquidité ω_L , limite de plasticité ω_p , le poids volumique γ , l'indice de vide e) et les propriétés mécaniques du sol (angle de frottement effectif, résistance au cisaillement, et indice de compression) et ont souligné que les COV moyens des propriétés mécaniques du sol sont plus grandes que celle de propriétés physiques du sol.

L'étendue de variation des valeurs de ces différentes propriétés est donnée par le Tableau 1.1 (Lee et al., 1983). Dans ce Tableau il est compilé les coefficients de variation (COV) reportés pour une large gamme de propriétés de sol. Les étendues de ces valeurs sont parfois assez larges et ne peuvent être considérées que comme indicatives des conditions d'un projet spécifique. La casse et Nadim (1996) ont aussi publié des valeurs du coefficient de variation (COV) relatifs à diverses propriétés de sols dans le Tableau 2.2

Tableau 2.1 Coefficients de variation pour l'essai technique du sol (Lee et al. 1983)

Test	Reported COV(%)	Source	Standard	Remarks
Absorption	25	1	25	
Air voids	16–30	4,16	20	
Angle of friction (sands)	5–15	2,3,20,21	10	
Angle of friction (clays)	12–56	2,20,21	–	Wide variation
Bitumen content	5–8	4,16	6	
CBR	17–58	1,4	25	
Cement content	13–30	4,5	20	
Clay content	9–70	1,2,14,15,22	25	
Cohesion (undrained) (clays)	20–50	2,20	30	
Cohesion (undrained) (sands)	25–30	2	30	
Compaction (OMC)	11–43	1,6,12	20,40	Lower value, clay soils; higher value, sands and gravels

Tableau 2.1 (Suite): Coefficients de variation pour l'essai technique du sol (Lee et al. 1983)

Test	Reported COV(%)	Source	Standard	Remarks
Compaction (MDD)	1–7	2,4,6,12,22	5	
Compressibility	18–73	2,15,21,22	30	
Consolidation coefficient	25–100	2,15,22	50	
Crushing value	8–14	1		
Density (apparent or true)	1–10	1.2,12,20,22	3	
Elastic modulus	2–42	17,18	30	
Elongation	18–33	1	25	
Flakiness	13–40	1,6	25	
Flow (bitumen)	11–15	4,16	15	
Grading (means)	9–31	1	25	
Grading (slopes)	19–37	1	30	On a Rosin–Rammer plot
Levels (e.g. pavement)	50–300	7,11	200	
Linear shrinkage	57–135	1,6	100	Refers to gravel and crushed rock; will be lower for soils
Liquid limit	2–48	2,4,10,12,14,15,20,22	10	
Los Angeles abrasion	31	1	30	
Moisture content	6–63	4,5,9,15,20,21,22	15	Is gamma distributed
compaction, "OMC"				
Permeability	200–300	2	300	
Plastic limit	9–29	2,12,14,15,20	1	
Plasticity index	7–79	1,4,6,10,12,15,20	30,70	Lower value clay soils; Higher value sandy, gravelly soils

Tableau 2.1 (Suite): Coefficients de variation pour l'essai technique du sol (Lee et al. 1983)

Test	Reported COV(%)	Source	Standard	Remarks
Thickness (stabilization work)	11–13	4,6	15	
Unconfined compressive strength	6–100	17,19,22	40	
Void ratio	13–42	2,4,15,21	25	

1. (Ingles and Noble 1975)	12. (Sherwood 1970)
2. (Lumb 1974)	13. (Hoede-Keyser 1970)
3. (Hoeg and Murarka 1974)	14. (Minty <i>et al.</i> 1979)
4. (Kuhn 1971)	15. (Corotis <i>et al.</i> 1975)
5. (Ingles and Metcalf 1973)	16. (Cranley 1969)
6. (Leach 1976)	17. (Otte 1978)
7. (Auff 1978)	18. (Kennedy 1978)
8. (Kennedy and Hudson 1968)	19. (Morse 1971)
9. (Wu 1974)	20. (Singh 1971)
10. (Mitchell 1993)	21. (Schultze 1975)
11. (Murphy and Grahame 1976)	22. (Stamatopoulos and Kotzias 1975)

Tableau 2.2 : Coefficients de variation des différentes propriétés du sol pour les données (Lacasse et Nadim 1996, Lumb 1974)

(a) Soil property	Soil type	pdf	Mean	COV(%)
Cone resistance	Sand Clay	LN	*	*
Undrained shear strength	Clay	N/LN		
	Clay (triaxial)	LN	*	5–20
	Clay (index S_u)	LN		10–35
	Clayey silt	N		10–30
Ratio S_u/σ'_{v0}	Clay	N/LN	*	5–15
Plastic limit	Clay	N	0.13–0.23	3–20
Liquid limit	Clay	N	0.30–0.80	3–20
Submerged unit weight	All soils	N	5–11 (kN/m ³)	0–10
Friction angle	Sand	N	*	2–5
Void ratio, porosity, initial void ratio	All soils	N	*	7–30
Over consolidation ratio	Clay	N/LN	*	10–35
(b) Soil property				
Density	All soils			5–10
Void ratio	All soils			15–30
Permeability	All soils			200–300
Compressibility	All soils			25–30
Undrained cohesion (clays)	All soils			20–50
Tangent of angle of shearing resistance (sands)	All soils			5–15
Coefficient of consolidation	All soils			25–50

Le Tableau 2.3 montre des valeurs représentatives de COV des paramètres de consolidation pour différents sols. Ces valeurs restent inférieures à celles reportées par Lee et al. (Tableau 2.1), elles atteignent un maximum de 50% , cela peut être du au nombre insuffisant données.

Tableau 2.3 : Valeurs représentatives de la variabilité des paramètres de consolidation exprimées en termes de coefficient de variation en %

Parameter	Soil	Reported COV (%)	Source
C_c, C_r	Bangkok Clay	20	Zhu <i>et al.</i> (2001)
	Various	25–50	Lumb (1974)
	Dredge Spoils	35	Thevanayagam <i>et al.</i> (1996)
	Gulf of Mexico Clay	25–28	Baecher and Ladd (1997)
c_v	Ariake Clay	10	Tanaka <i>et al.</i> (2001)
	Singapore Clay	17	Tanaka <i>et al.</i> (2001)
	Bangkok Clay	16	Tanaka <i>et al.</i> (2001)

Le Tableau 2.4 montre la variabilité des valeurs mesurées en laboratoire de l'angle de frottement ϕ pour une variété de sols. L'éventail de variabilité est large, et il n'est pas clair ce que l'on peut conclure de ces résultats. Baecher et al. (1983) rapportent des variabilités de ϕ pour trois types de résidus miniers (Tableau 2.5) ainsi que des informations du troisième et quatrième moment statistique (β_1 et β_2) qui permettent de représenter les données sur le diagramme de distributions de Pearson.

Tableau 2.4 : Variabilité de ϕ mesuré au laboratoire pour différents sols

Soil type	COV	Source
Various soils	9	(Lumb 1966)
Clay	40	(Kotzias <i>et al.</i> 1993)
Alluvial	16	(Wolff 1996)
Sands	2–5	(Lacasse and Nadim 1996)
Tailings	5–20	(Baecher <i>et al.</i> 1983)

Tableau 2.5 : variabilités mesurées en laboratoire pour cinq (5) dépôts de résidus miniers (Baecher et al, 1983)

Commodity	<i>n</i>	Mean	Standard Deviation	COV	Skew (β_1)	Kurtosis (β_2)	pdf
Copper	26	30.4	2.56	0.08	0.0015	2.17	Beta/Uniform
Copper	16	35.7	2.90	0.08	0.750	3.99	Beta/Gamma
Copper	21	36.2	4.35	0.12	0.100	3.01	Normal
Uranium	23	35.8	6.04	0.17	0.202	3.02	Normal
Gypsum	19	41.6	5.80	0.14	0.146	2.68	Normal

Pour les essais des propriétés du sol qui ne nécessitent pas d'échantillons intacts, par exemple Limites d'Atterberg, des essais répétés sont possibles. Hammitt (1966) rapporte les résultats d'une série de tests de laboratoire comparatifs menés par l'American Council of Independent Laboratoires. Dans ces essais comparatifs, des échantillons de trois sols, aussi identiques que possible, ont été distribués à différents laboratoires. Chaque laboratoire relevé des mesures de la limite de liquidité, de la limite plastique, de l'indice de plasticité et le poids spécifique des grains solides. Les résultats sont résumés dans le Tableau 2.6. Les résultats suggèrent que les coefficients de variation des erreurs de mesure aléatoires pour la limite de liquidité et la limite de plasticité varient de 5 % à environ 15 %. Les valeurs du COV concernant le poids spécifique des grains solides sont assez petites, généralement environ 2 % seulement. Le fait que les erreurs aléatoires relatives aux limites d'Atterberg soient importantes ne doit surprendre personne quand on sait comment ces limites sont déterminées.

Tableau 2.6 : analyse statistique des tests de sol effectués sur des échantillons de sol identiques distribués par le conseil américain des essais indépendants de laboratoire (Hammitt 1966)

Type of test	Highly Plastic Soil		Medium Plastic Soil		Low Plastic Soil	
	Mean	Standard Deviation	Mean	Standard Deviation	Mean	Standard Deviation
LL	54.3	5.4	32.7	2.3	27	1.7
PL	22.2	3.4	22.4	2.8	23.6	2.4
PI	32	5.7	10.4	3.6	3.8	2.1
Specific Gravity	2.63	0.115	2.66	0.060	2.69	0.054

2.6.2. Lois de distribution des propriétés des sols

La distribution des propriétés des sols est indispensable à connaître pour le traitement des applications géotechniques à savoir les calculs d'ouvrages, organisation des reconnaissances, etc...

La loi la plus connue et la plus utilisée par les géotechniciens est la loi normale ou « loi de Gauss », vu sa simplicité, pourtant elle n'est pas toujours la mieux adaptée aux problèmes de mécanique des sols, notamment pour les calculs de stabilité, pour cela il serait préférable de se pencher sur l'ensemble des distributions appelées : « Système de Pearson » (Harr, 1977) illustré à la Figure 2.1

Par ailleurs, il faut noter qu'une distribution normale ne s'applique pas correctement aux paramètres géotechniques dont les valeurs numériques ne sont ni négatives, ni infinies, car la plupart des paramètres courants ont des valeurs uniquement positives et sont bornées supérieurement ou inférieurement. Recordon (1985), affirme qu'étant donné que la distribution normale donne des probabilités non nulles de $-\infty$ et à $+\infty$, on utilise en géotechnique la distribution bêta, plus générale, bornée vers le haut et vers le bas et qui peut être dissymétrique.

D'après les études faites par Lumb (1966) sur les paramètres de résistance au cisaillement (C' et ϕ') d'un sol de Hong Kong, le paramètre $\tan \phi'$ a une distribution approximativement normale, mais ce n'est pas le cas de la cohésion C' .

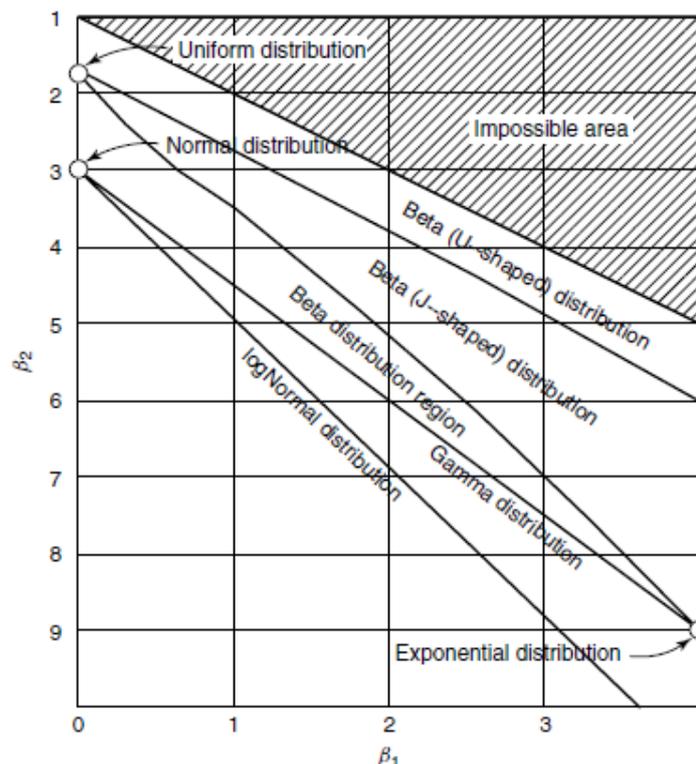


Figure 2.1: Classification de Pearson (Baecher et Christian, 2003)

En 1970, Lumb a écrit que le paramètre C' se conforme à une distribution bêta asymétrique, mais que, néanmoins, la partie centrale de la distribution peut être considérée comme normale. Lumb a ensuite considéré que ces résultats doivent être généraux et s'appliquer aussi ailleurs (Harr, 1977). Les études de Schultze (1972) confirment les résultats obtenus par Lumb.

Ces études ont porté sur une gamme de sols assez étendue, comportant des sables de différentes granulométries, un limon et une argile. La plupart des paramètres étudiés suivent une loi normale avec un niveau de signification de 0,95. Quant à sa résistance à la compression simple, elle a un coefficient de variation très élevé et est ainsi peu compatible avec une loi normale.

Singh (1972) a étudié la variabilité des coefficients de poussée et de butée K_a et K_p en fonction de la variable aléatoire et a montré que les deux coefficients suivent approximativement une loi normale.

La recherche de la distribution bêta qui est la plus proche de la distribution observée d'un paramètre nécessite le calcul des quatre paramètres suivants: valeur moyenne, variance, coefficient d'asymétrie β_1 , et coefficient d'aplatissement β_2 . Cette étude a été réalisée pour différents sols. Pour les paramètres C' et $C_c/(1+e_0)$, les distributions sont approximativement normales ($\beta_1 = 0$ et $\beta_2 = 3$). Pour l'indice des vides (e) ou le coefficient de perméabilité (k), il faudrait se méfier de cette approximation.

2.6.3. Corrélations

Les paramètres utilisés en mécanique des sols, décrivent pour la plupart des comportements macroscopiques qui résultent de la superposition de nombreux phénomènes élémentaires. Ces derniers déterminent l'ensemble des propriétés du sol, ce qui explique l'existence de certaines relations entre les paramètres pour un sol de composition minéralogique, granulométrique et chimique donnée.

En mécanique des sols, l'étude des corrélations entre les propriétés des sols, en particulier, les relations liant les propriétés physiques et d'identification des sols (teneur en eau, poids volumiques, limites d'Atterberg...) et leurs propriétés mécaniques (compressibilité, résistance au cisaillement) présente un grand intérêt pratique, car les méthodes de détermination de ces propriétés sont plus ou moins rapides et qu'il vaut mieux réaliser beaucoup d'essais simples et rapides que peu d'essais complexes, longs et éventuellement onéreux.

Il existe dans la littérature, peu de données sur les coefficients de corrélation entre les paramètres des sols. La plupart ont été fournies par Holtz et Krizek (1971) qui ont effectué des mesures sur l'aéroport international O'HARE de Chicago. La matrice des données $[X_{ij}]$, comportait 142 observations des sept paramètres suivants: résistance à la compression simple q_u , teneur en eau naturelle ω_n , limite de liquidité ω_L , limite de plasticité ω_p , pourcentages de sable, de limon et d'argile. La matrice de corrélations entre ces paramètres est donnée par Le Tableau 2.7.

On peut relever qu'il existe des corrélations faibles entre certaines paires de paramètres. Par exemple, la résistance à la compression simple est faiblement corrélée à la limite de liquidité avec un coefficient de corrélation qui varie entre 0.2 et 0.5 selon le sol.

Ces deux auteurs ont également fourni des relations de corrélations multiples concernant les propriétés des sols.

Tableau 2.7 Matrice de corrélation entre les propriétés (Holtz and Krizek 1971)

	q_u (tsf)	w_n (%)	LL(%)	PL(%)	%Sand	%Silt	%Clay
q_u (tsf)	1.00	-0.54	-0.30	-0.12	-0.20	-0.29	0.41
w_n (%)	-0.54	1.00	0.67	0.48	-0.15	0.36	-0.19
LL(%)	-0.30	0.67	1.00	0.55	-0.36	0.20	0.10
PL(%)	-0.12	0.48	0.55	1.00	-0.40	0.29	0.06
%Sand	-0.20	-0.15	-0.36	-0.40	1.00	-0.27	-0.55
%Silt	-0.29	0.36	0.20	0.29	-0.27	1.00	-0.64
%Clay	0.41	-0.19	0.10	0.06	-0.55	-0.64	1.00

D'après Harr (1977), l'analyse de régression consiste à étudier la relation fonctionnelle entre deux variables et de prédire la valeur d'une variable à partir de celle d'une autre ou de plusieurs autres. La détermination du degré de correspondance des relations constitue l'analyse de corrélation.

Shultze (1972) a défini quelques relations entre diverses propriétés des sols en indiquant le nombre d'observations et le coefficient de corrélation correspondant.

Ces relations concernent respectivement :

- *L'indice des vides initial e_0 et le coefficient $\cotg \phi'$ d'un sable.
- * Le nombre de coups N_{30} (essai SPT) et l'indice de densité I_d d'un sable .
- * La teneur en eau ω et la cohésion non drainée C_u d'une argile.
- *L'indice des vides initial e_0 et le coefficient ν de la relation:

$$E = \nu (\sigma'/\sigma_{e_0})^\omega \quad (2.7)$$

Ou E est le module de l'élasticité d'une argile.

- * Le coefficient ν précèdent et la teneur en eau ω d'une argile organique.
- * L'indice des vides initial e_0 et le tassement relatif d'un sable.
- Favre (1972) cite dans sa thèse les résultats obtenus par Tran-Vo Nhiem (1971), lors de l'étude d'un pénétro-scissomètre, pour les corrélations entre les variables suivantes :

- * Le nombre N de coups nécessaires pour l'enfoncement de 15 cm de la tête du pénétro-scissomètre.

*La contrainte de cisaillement maximale τ_{\max} mesurée au scissomètre.

* Le poids volumique du sol sec γ_d

*La teneur en eau ω .

* Les paramètres C_u et ϕ_u du cisaillement non drainé du sol.

Il rapporte également les travaux d'Anquetil et Cambu (1969) sur les corrélations entre les paramètres du sol à l'optimum Proctor (ω_{op} et γ_{dop}) et ses caractéristiques physiques (limites d'Atterberg et granulométrie).

- Corottis et Al (1975) ont donné une matrice de corrélation pour les paramètres d'identification de plus de 500 sols, principalement argileux, prélevés en Grèce et aux Etats-Unis.
- En France, des expériences fructueuses de régression multiple ont été réalisées par Tisot (1974) qui a étudié les corrélations entre la résistance à la pénétration (statique) et plusieurs variables d'état sur des matériaux compactés du «Kemper de Lorraine ».
- Biarez et Favre (1975) ont étudié les corrélations entre paramètres de propriétés mécaniques dépendant de l'état initial.
- Matsuo et Asaoka (1977) ont calculé les coefficients de corrélation de différents paramètres de compressibilité pour 16 types de sols japonais (argiles et limons). Leurs résultats ont donné des variables très importantes des coefficients calculés entre les paramètres, et même des changements de signe d'un sol à un autre, ce qui prouve que les relations qui peuvent exister sur un site ne sont pas l'expression d'une loi générale mais résultent de conditions locales précises.

En fait les paramètres qui ont été comparés, indice des vides e_o , pressions de préconsolidation P_c , indice de compression C_c et coefficient $mc = C_c/(1+e_o)$ n'ont aucune raison d'être liés deux à deux puisque la pression de consolidation dépend essentiellement de l'histoire des charges appliquées au sol, l'indice de compression est lié à la structure et à la nature du sol, l'indice des vides initial dépend à la fois de C_c et de l'histoire de chargement et mc est un mélange de C_c et de e_o

Les corrélations que l'on peut établir entre les paramètres physiques et mécaniques des sols sont plus ou moins générales suivant les paramètres concernés. Habituellement, la validité d'une corrélation est limitée à la nature du sol étudié : les propriétés des sables, des tourbes ou des argiles n'obéissent pas aux mêmes lois.

2.7. ANALYSE EN COMPOSANTES PRINCIPALES

L'analyse en composantes principales (ACP ou PCA en anglais Principal Component Analysis) est une méthode de la famille de l'analyse des données et plus généralement de la statistique multi variée, qui consiste à transformer des variables liées entre elles (corrélées en statistique) en nouvelles variables décorrélées les unes des autres. Ces nouvelles variables sont nommées « composantes principales » ou axes principaux. Elle permet au statisticien de résumer l'information en réduisant le nombre de variables.

Il s'agit d'une approche à la fois géométrique (les variables étant représentées dans un nouvel espace, selon des directions d'inertie maximale) et statistique (la recherche portant sur des axes indépendants expliquant au mieux la variabilité - la variance -des données). Lorsqu'on veut compresser un ensemble de variables aléatoires, les premiers axes de l'analyse en composantes principales sont un meilleur choix, du point de vue de l'inertie ou de la variance.

L'ACP est majoritairement utilisée pour:

- décrire et visualiser des données ;
- les décorréler ; la nouvelle base est constituée d'axes qui ne sont pas corrélés entre eux ;
- les débruiter, en considérant que les axes que l'on décide d'oublier sont des axes bruités.
- effectuer une réduction de dimension des données d'entraînement en Apprentissage Automatique

pour réduire la taille de modèle d'éléments finis

2.7.1 Principe de l'ACP

Le principe est simple : Il s'agit en fait de résumer l'information qui est contenue dans une large base de données en un certain nombre de variables synthétiques appelées (Composantes principales).

2.7.2. les points qui nous intéressent

L'ACP permet d'explorer et de résumer un tableau constitué uniquement de variables quantitatives figure 2.2, et ce, de trois façons :

- 1) en montrant les ressemblances entre les individus (observations),
- 2) en révélant les liaisons entre les variables quantitatives et
- 3) en résumant l'ensemble des variables du tableau par des variables synthétiques nommées composantes principales.

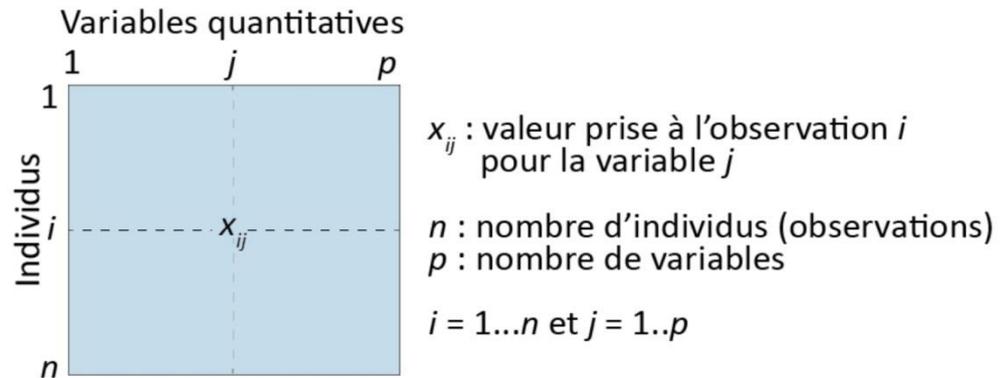


Figure 2.2 : variables quantitatives

Les variables bien représentées sont celles qui sont proches du cercle (figure 2.3) , celles qui sont proches de l'origine sont mal représentées.

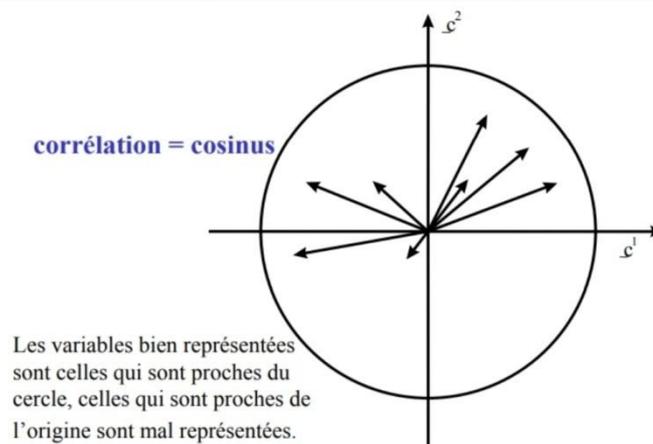


Figure 2.3 : représentation des variables dans un plan factoriel- Cercle de corrélations

2.8. Conclusion

Les statistiques constituent un outil qui aide à appliquer les bonnes méthodes de collecte de données, à effectuer la bonne analyse et à présenter efficacement les résultats. Les statistiques sont une approche scientifique pour analyser des données numériques afin de maximiser leur interprétation, leur compréhension et leur utilisation. "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 aidera à mener des études bien conçues qui produisent des résultats valides et fiables" (Amar et al., 1973).

CHAPITRE III : RECONNAISSANCES GEOTECHNIQUES

3.1. INTRODUCTION

Le développement de l'étude de la caractérisation géotechnique du sol de notre projet est basé sur une bonne connaissance des différentes unités géotechniques ainsi que les caractérisations physiques et mécaniques de chaque couche, une campagne de reconnaissance géotechnique a été effectuée proposant une de réaliser une série d'investigation sur terrain et un programme complet d'essais au laboratoire sur les échantillons récupérés.

3.2. COMPAGNES DE PROSPECTION ET RECONNAISSANCE GEOTECHNIQUE

Pour la reconnaissance du zone deux campagnes été effectuées, une campagne pendant la réalisation de l'avant projet détaillé (APD) en 2013, une autre pendant la phase de réalisation en 2015 celle-ci est complémentaire à la première (CPC) et apporte plus d'informations sur les caractéristiques du sol en place.

Le tronçon de la ligne de métro qui fait l'objet de notre étude s'étend de Bab Ezzouar à DAR EL BEIDA sur une distance de 2.8 Km. Pour faciliter la présentation des résultats, nous avons divisé le tronçon en quatre Zones (Fig. 3.1):

- La zone I : c'est la zone qui comprend la station centre des affaires ;
- La zone II : elle comprend le puits de ventilation 09 ;
- la zone iii : concerne la station aéroport d'alger ;
- la zone iv : se trouve au niveau de puits de ventilation 10 d'alger ;

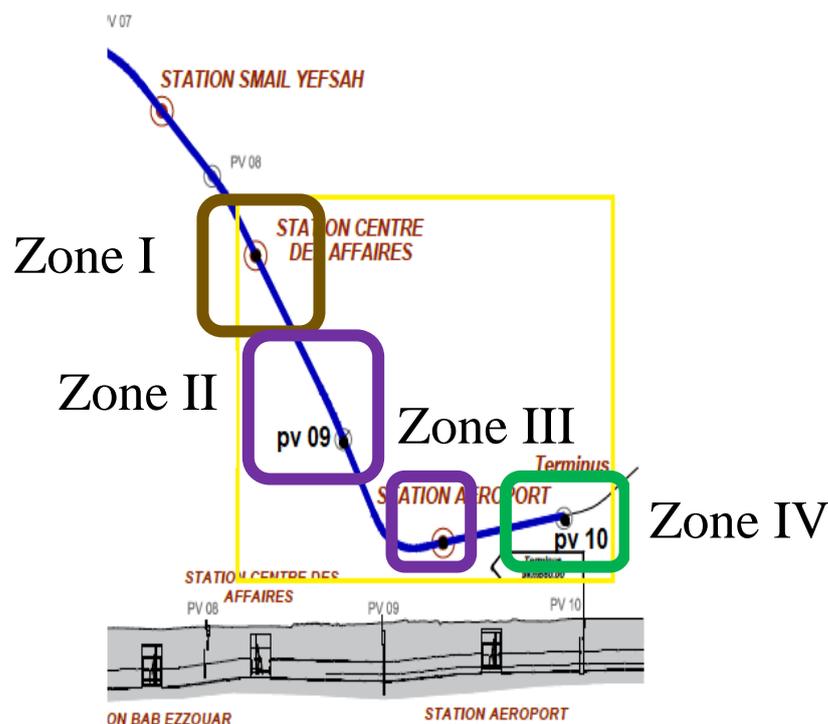


Figure 3.1 : les quatre zones du tronçon de la ligne de métro considéré

Plusieurs sondages carottés et essais géotechniques in-situ ont été réalisés au niveau de chaque zone : les tableaux 3.1 à 3.4 listent tous les sondages réalisés au niveau des zones I à IV, respectivement, et les figure 3.2 à 3.5 montrent les emplacements de ces sondages .

a- Zone I – station centre des Affaires

Tableau 3-1 : les sondages réalisés dans la Zone I

zone	phases	sondages	Profondeur(m)
Zone I (Station centre des Affaires)	APD	S 37	34
	CPC	SC 73	48
		SC 74	48,1
		SC 75	45
		SC 76	49,5
		SC 77	38
		SC 78	37
		SC 79	37,5

b- Zone II puits de ventilation 9

Tableau 3. 2: les sondages réalisés dans la Zone II

zone	phases	sondages	Profondeur (m)
Zone II (puits de ventilation)	APD	S43	31
		S45	31
	CPC	SC 80	35
		SC 81	48
		SC 82	38
		SC 83	38
		SC 84	37

c- Zone III – station Aéroport international

Tableau 3.3 : les sondages réalisés dans la Zone III

zone	phases	sondages	Profondeur (m)
Zone III (station Aéroport international)	APD	S 46	31
		S 47	31
	CPC	SC 85	37
		SC 86	48
		SC 87	48
		SC 88	48
		SC 89	48

d- Zone IV – puits de ventilation 10

Tableau 3.4 : les sondages réalisés dans la Zone IV

zone	phases	sondages	Profondeur (m)
Zone IV (puits de ventilation 10)	cpc	SC 93	37
		SC 94	37
		SC 95	37
		SC 97	38
		SC 98	38

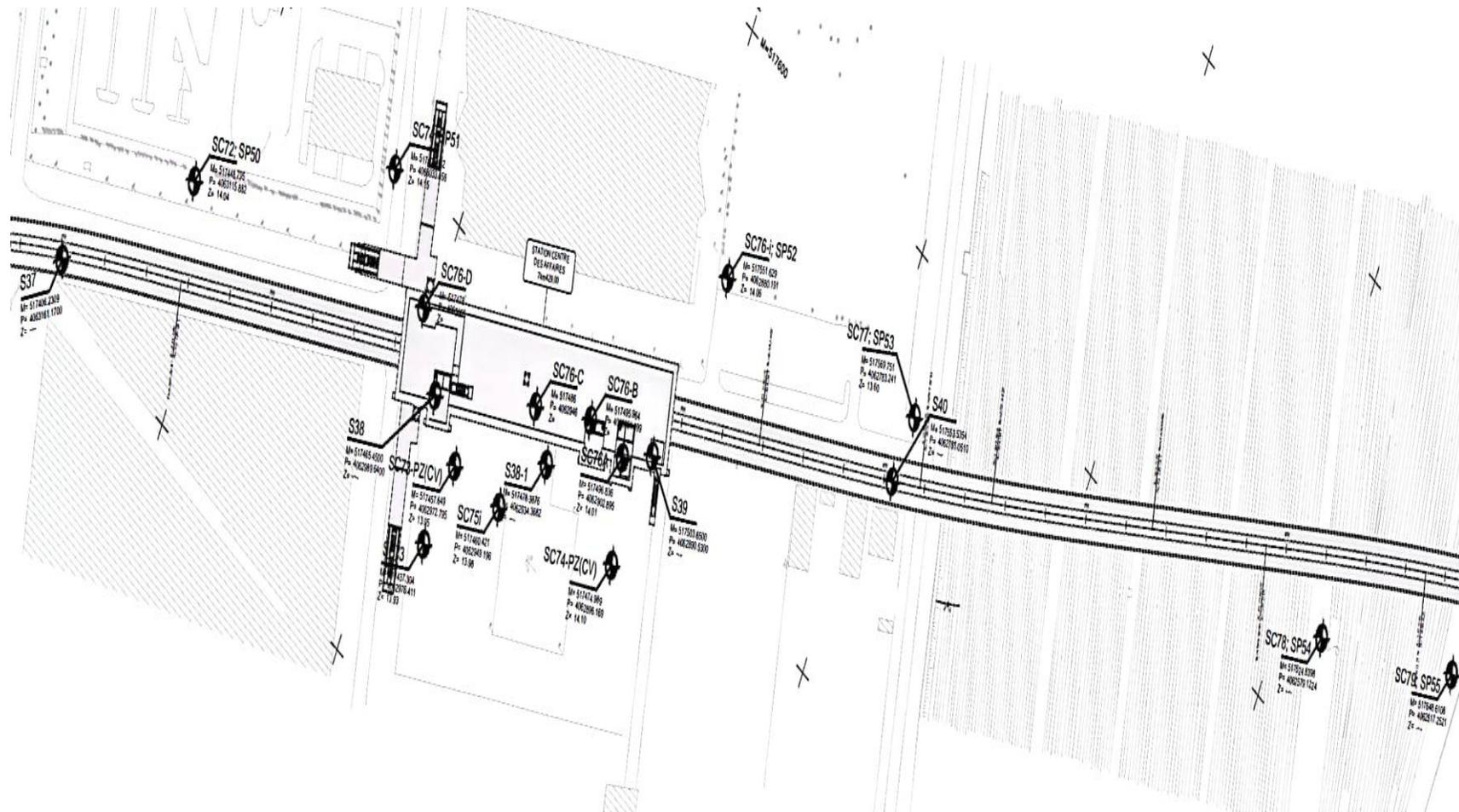


Figure 3.2 emplacement des sondages dans la zone I (Station centre des affaires)

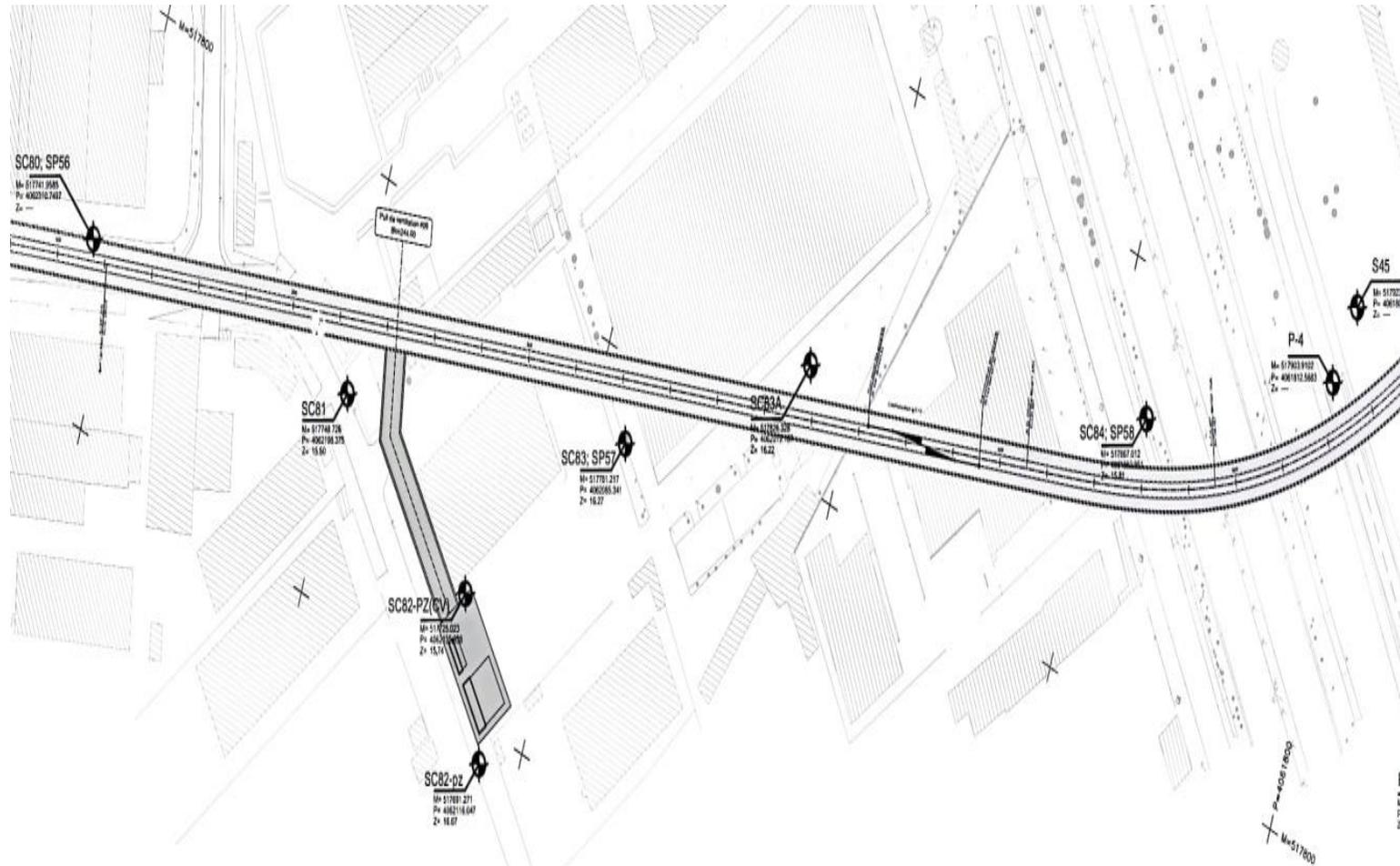


Figure 3.3 emplacement des sondages dans la zone II (PV9)

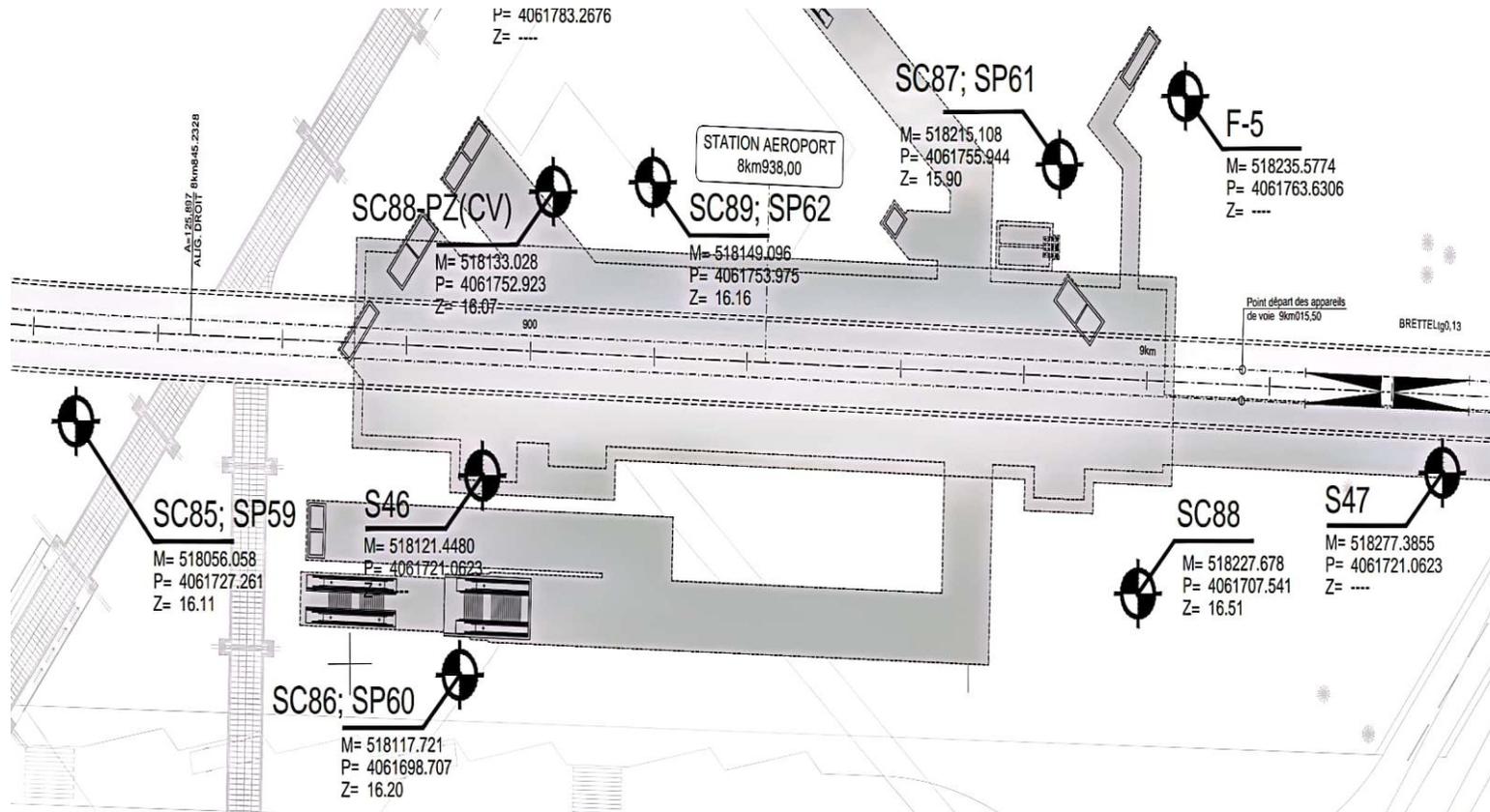


Figure 3.4 emplacement des sondages dans la zone III (Station Aéroport international)

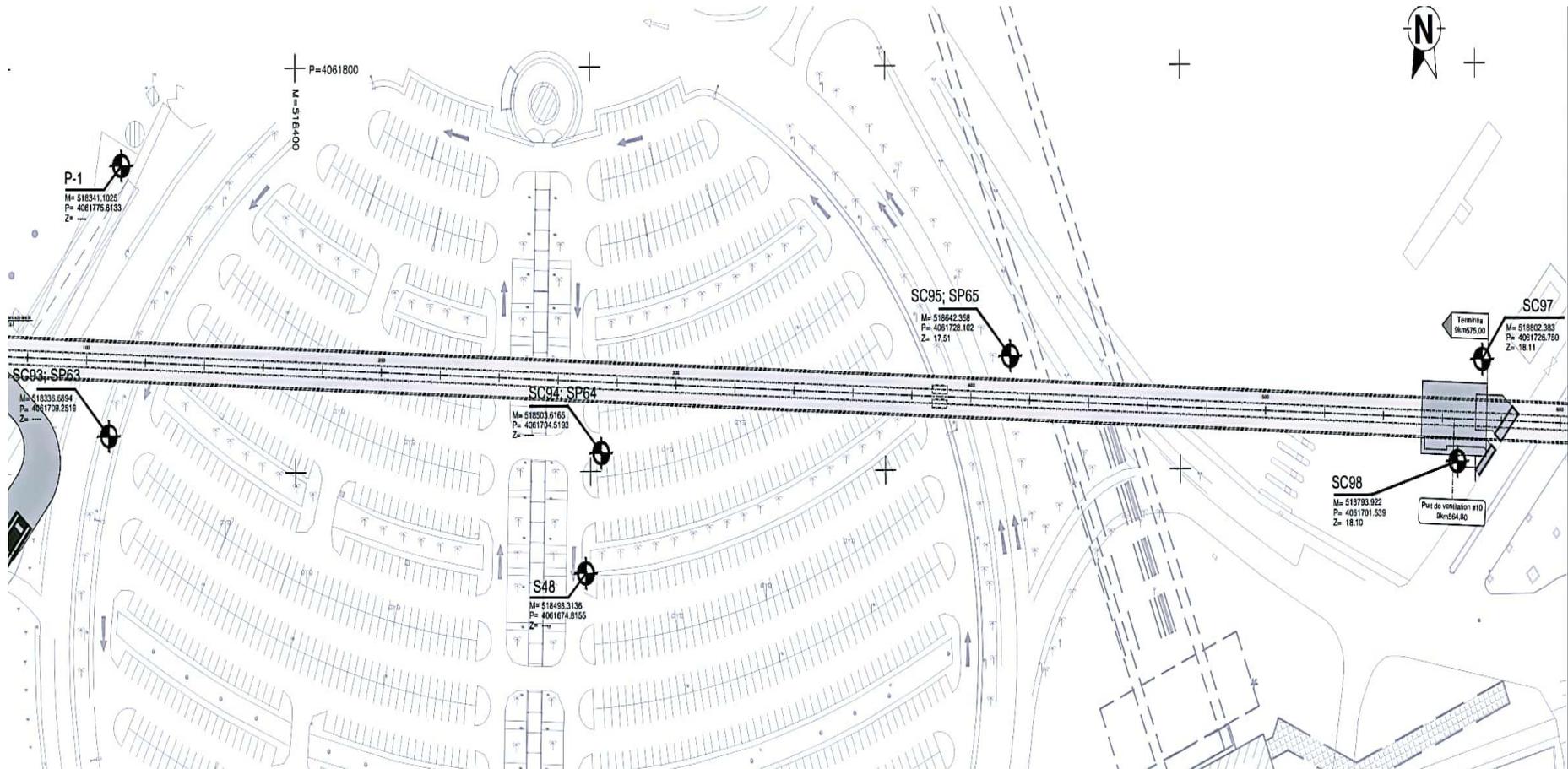


Figure 3.5 emplacement des sondages dans la zone IV(pv10)

3.3. CONTEXTE GEOLOGIQUE

3.3.1. Zone I – Centre des Affaires

Selon l'information recueillie dans les campagnes de prospection de l'APD et complémentaire (CPC), le sous-sol au niveau de la station Centre des Affaires sera creusée s'agissent constitué de dépôts quaternaires récents et anciens.

- Le quaternaire récent, englobe deux couches de nature différente, la plus superficielle est constituée par sols argilo limoneux avec passages de sable, et l'autre, la plus profonde, par sols sablo-argileux. Dans sa partie plus profonde le quaternaire récent est constitué par une couche sablo-limoneux sur lequel nous trouvons un horizon argileux gris / brun qui sera divisé en trois horizons géotechniques différents en raison des contrastes de résistance et déformabilité révélés par des essais PMT et SPT.

- Le quaternaire ancien est constitué, en bas, par des marnes de couleur grisâtre et en haut par une couche de sable avec passages grésifiés / cimentés. Dans le dernier, il a été différencié quelques zones où est évidente la présence de grès.

- Les données disponibles ont permis d'établir une succession de différents horizons géologiques en profondeur. La composition du sous sol est résumé dans le Tableau 3-5. La Figure 3-6 présente un profil transversale de la zone I.

Tableau 3-5 : Résumé facies existantes dans la zone I et leurs profondeurs

Horizon des couches	Symboles	Profondeurs moyennes(m)
remblais	R	0 -2,5
Argile limono-sableuses mole a ferme	Qa	0,5-8
Sables limono-argileux moyennement dense	Qs(1)	4-12
Argile gris ferme	Qa	1- 17,5
Argile gris ferme a dure	Qa	6- 26,6
Argile gris/jaune ferme	Qa	17,5 -36,1
Sable argileux-limoneux moyennement dense	Qs	20,3- 40,2
Sables et sable grésifiés denses très denses	QMs	17,4-46,8
Grés friable	QM-Gr	19,5- 25,5 26,7-37
Argile grise raide	QM	>44,6

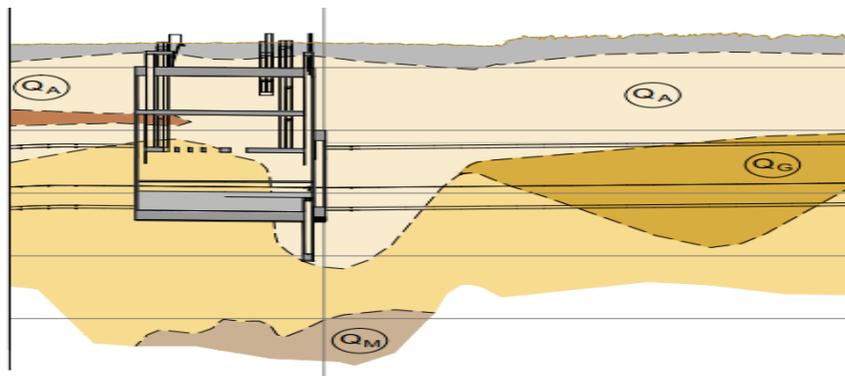


Figure 3-6 Schéma représentant les horizons géologiques au niveau de la zone I

3.3.2 . Zone II – puits de ventilations 09

Selon les rapports géotechniques , la zone d'implantation du puits de ventilation 9 est constituée par des terrains quaternaires et Concernant la lithologie des sols à l'endroit du PV9, on peut dire que les matériaux du plio-pleistocène , plus profonds , sont constitués de deux couches argilo-marneuses intercalées par un niveau de sable fin limoneux et une couche de grès friable trouvée uniquement dans le sondage SC82. Sur les unités plio- pleistocéniques , reposent les matériaux géologiques du quaternaire plus récent. Ces matériaux sont constitués par une couche argileuse de couleur jaunâtre , dans la partie inférieure et par des argiles sableuses et graveleuses marron-jaunâtre, dans la partie supérieure. Les remblais, qui reposent sur le quaternaire récent, sont constitués essentiellement par des matériaux de nature argileuse.

La succession des horizons géologiques et leurs profondeurs sont résumées dans le tableau 3.6 et présentées schématiquement par la Figure 3.7.

Tableau 3-6 : Résumé des profondeurs facies existantes Dans zone II

Horizon des couches	Symboles	Profondeurs moyennes(m)
remblais	R	0-4
Argile sableuse et graveleuse marron jaunâtre	Qag	4-14
Argile jaunâtre	Qa	14- 19
Argile marneuse gris-noirâtre	QM	19-32
grès friable	QM-Gr	32- 36
Sables limoneux fins	QMs	36-42
Argile marneuse gris-noirâtre	Qm	>42

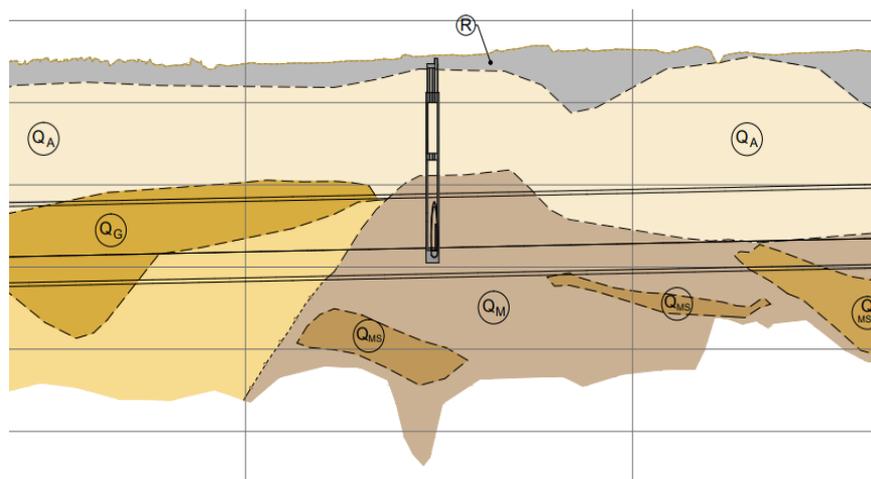


Figure 3.7 Schéma représentant les horizons géologiques au niveau de la zone II

3.3.3. Zone III –station Aéroport international

Les rapports géotechniques ont révélé la présence, au niveau de la Station Aéroport, de dépôts quaternaires avec facies lithologiques hétérogènes constitués par des argiles limoneuses avec passages lenticulaires graveleux et sableux par endroits et argiles avec peu de graves et peu de sable. Entre ces argiles peu perméables et les formations du pliocène, il y a une couche de graves dans une matrice argileuse et sableuse, laquelle semble avoir une perméabilité plus élevée, selon l'information apportée par des lectures piézométriques. Sous ces dépôts, se trouve le substratum marno-gréseux du pliocène, constitué par une couche sable argileuse et gréseuse fracturée, susceptible d'être aussi perméable, en dessous de laquelle se trouve les marnes grisâtres et jaunâtres imperméables.

La succession des horizons géologiques et leurs profondeurs sont résumées dans le tableau 3.7 et présentées schématiquement parla Figure 3.8.

Tableau 3.7 : Résumé des profondeurs des facies existantes dans zone III

Horizon des couche	Symboles	Profondeurs moyennes (m)
Remblais	R	0.0 - 3.0
Argiles limoneuses	Qa	3,0-18,5
Argiles avec peu de graves et peu de sable	Qag	18,5-31,0
Graves dans une matrice argileuse et sableuse	Qg	31,0-36,0
Sables-argileux et gréseux	QMs	36,0-39,0
Marnes	QM	>39,0

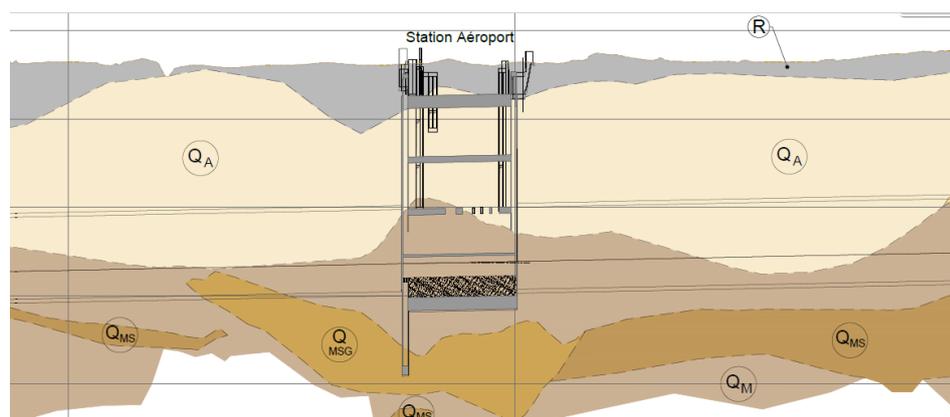


Figure 3.8 Schéma représentant les Horizons géologiques au niveau de la zone III

3.3.4 Zone IV – puits de ventilation 10

Dans la zone du puits de ventilation 10, il est révélé la présence de dépôts quaternaires avec faciès lithologiques constitués par des argiles limoneuse superposés aux faciès constitués par des sables limoneux-argileux, parfois mêlés de cailloux avec présence de grés. Les données disponibles ont permis d'établir une succession de différents horizons géologiques avec leurs profondeurs, qui sont résumé dans le Tableau 3.8, et représentés schématiquement par la figure 3.9

Tableau 3.8 Résumé des profondeurs des faciès existantes dans zone IV

Horizon des couches	Symboles	Profondeurs Moyennes(m)
Remblais	R	0-1,5
Argile limoneuse peu sableuse par endroit	QA	1,5- 7,0 (SC97) 1,5-9,00 (SC98)
Sables limoneux-argileux avec présence des grés	QS	7,00-11.45 (SC97) 9,00-13,50 (SC98)
Argile Marneuse a Marne	QM	11,45-25.50 (SC97) 13,50 -19,50 (SC98)
Sable fin à moyen limoneux, avec passages des grés broyé a sain	QMs	25,50-36.40 (SC97) 19,50-36.00 (SC98)
Argile Marneuse a Marne	QM	36,00-38,00

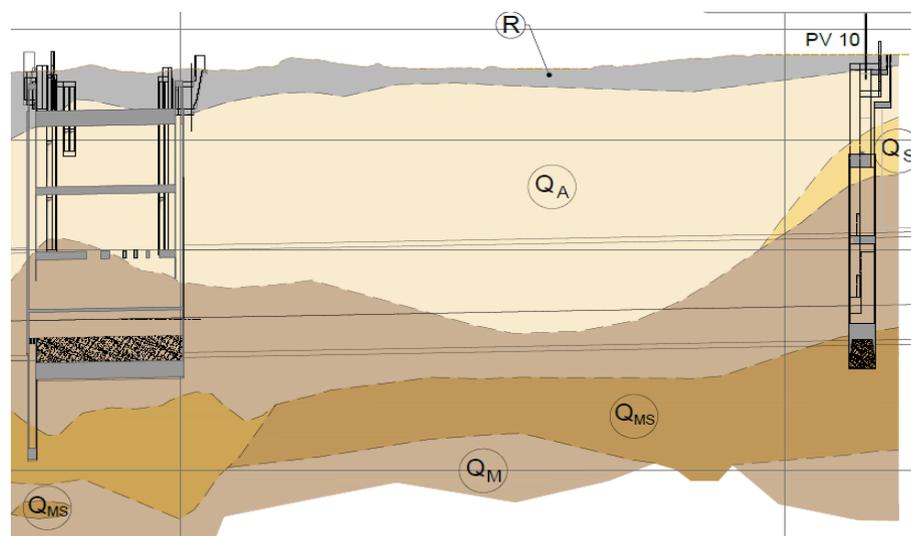


Figure 3.9 Schéma représent les horizons géologiques au niveau des couche de la zone IV

3.4. ESSAIS GEOTECHNIQUES DE LABORATOIRE

Une série d'essais au laboratoire pour l'identification des caractéristiques physiques et mécaniques du sol a été réalisée sur des échantillons intacts et remaniés, recueillis à partir des différents sondages carottés réalisés dans les quatre zones d'études.

3.4.1. Zone I – Centre des affaires

Le tableau 3.9 résume tous les essais au laboratoires réalisés dans la zone I- centre des affaires lors des deux campagnes de prospection APD et CPC.

Tableau3.9 : Résumé des essais en laboratoires de la zone I

Sondage	S37	SC73	SC74	SC75	SC76	SC77	SC78	SC79
	Quantité d'essais							
Granulométrie	3	2	3	3	3	2	2	5
Limite d'Atterberg	3	2	3	3	3	2	2	5
Densité des particules solides	3	2	3	3	3	2	2	5
Masse volumique (humide/sèche)	3	2	3	3	3	2	2	5
Teneur en eau	3	2	3	3	3	2	2	5
Degré de saturation	3	2	3	3	3	2	2	5
Résistance à la compression simple	2	1	1	-	-	1	2	1
Cisaillement direct	-	-	1	2	1	-	-	-
Compressibilité à l'odomètre	-	1	1	1	1	-	-	-
Gonflement libre	-	1	1	1	1	-	-	-
Cisaillement au triaxial	-	-	-	-	-	1	-	-

Les résultats de tous ces essais d'identification physiques et mécaniques sont présentés dans les tableaux B.1 et B.2 (Annexe B).

3.4.2. Zone II – Puits de ventilation 9

Le Tableau 3.10 résume le nombre d'essais d'identification physique et mécaniques effectués en laboratoire sur des échantillons prélevés des sondages carottés réalisés dans la zone II.

Tableau 3.10 : Résumé des essais en laboratoires de la zone II

Sondage	S45	S43	SC80	SC81	SC82	SC83	SC84
	Quantité d'essais						
Granulométrie	3	2	2	4	6	1	2
Limite d'Atterberg	3	2	2	5	6	3	2
Densité des particules solides	-	-	2	5	6	3	2
Masse volumique(humide/sèche)	3	2	2	5	6	3	2
Teneur en eau	3	2	2	5	6	3	2
Degré de saturation	2	2	2	5	6	-	2
Résistance à la compression simple	3	2	1	3	2	1	2
Cisaillement direct	-	2	-	1	2	1	-
Compressibilité à l'odomètre	-	-	1	1	2	-	-
Gonflement libre	-	-	-	1	1	-	-
Cisaillement au triaxial	-	-	1	1	2	-	-

Les résultats de tous ces d'identification physiques et mécaniques sont présentés dans les tableaux B.3 et B.4 (Annexe B).

3.4.3. Zone III – Station aéroport

Le tableau 3.11 résume la quantité de tous les essais au laboratoires réalisés dans la zone III– Station de l'Aéroport, lors des deux campagnes de prospection APD et CPC.

Tableau 3.11 : Résumé des essais en laboratoires de la zone III

Sondage	S46	S47	SC85	SC86	SC87	SC88	SC89
	Quantité d'essais						
Granulométrie	3	3	3	4	5	5	3
Limite d'Atterberg	3	3	3	4	5	5	3
Densité des particules solides	-	-	3	4	4	4	2
Masse volumique(humide/sèche)	3	3	3	4	5	5	3
Teneur en eau	3	3	3	4	5	5	3
Degré de saturation	3	3	3	4	5	5	3
Résistance à la compression simple	2	3	2	3	2	2	2
Cisaillement direct	3	3	1	-	2	3	-
Cisaillement au triaxial	-	-	1	-	-	-	-
Compressibilité à l'odomètre	-	-	-	1	1	2	2
Gonflement libre	-	-	-	1	1	2	2

Les résultats de tous ces essais d'identification physiques et mécaniques sont présentés dans les tableaux B.5 et B.6 (Annexe B).

3.4.4. Zone IV – Puits de ventilation 10

Le Tableau 3.12 présent un résumé de la quantité d'essais mécaniques et d'identification physique, effectués au laboratoire, sur des échantillons prélevés dans la zone de puits de ventilation 10

Tableau 3.12 Résumé des essais en laboratoires de la zoneIV

Sondage	SC93	SC94	SC95	SC97	SC98
	Quantité d'essais				
Granulométrie	3	2	3	4	3
Limite d'Atterberg	3	2	3	4	3
Densité des particules solides	3	2	3	4	3
Masse volumique(humide/sèche)	2	2	3	4	3
Teneur en eau	2	2	3	4	3
Degré de saturation	3	2	3	4	3
Résistance à la compression simple	2	1	2	2	-
Cisaillement direct	-	-	-	1	-
Cisaillement au triaxial	-	-	-	1	-
Compressibilité à l'odomètre	-	-	-	-	-
Gonflement libre	-	-	-	-	-

Les résultats de tous ces essais d'identification physiques et mécaniques sont présentés dans les tableaux B.7 et B.8 (Annexe B).

3.5. CLASSIFICATION GEOTECHNIQUE DES SOLS

Dans ce qui suit, il sera procédé à la classification géotechnique des sols, en utilisant les résultats des analyses granulométriques et des limites d'Atterberg relatifs aux échantillons prélevés à différentes profondeurs de chaque sondage.

3.5.1. Zone I – Centre des affaires

1- Sondage 37

Tableau 3.13 : Résultats de l'analyse granulométrique S 37

Sondage	Profondeur (m)	Granulométrie	Limite d'Atterberg			Classification du sol
		Pourcentage <80 µm (%)	ω_L (%)	ω_P (%)	I_p (%)	
S37	6 - 6,5	50,57	53	24	29	Argile très plastique (At)
	9 - 9,6	94,37	57	25	32	Argile très plastique (At)
	15,20 - 15,65	77,98	70	29	41	Argile très plastique (At)

2- Sondage SC73

Tableau 3,14 Résultats de l'analyse granulométrique SC 73

Sondage	Profondeur (m)	Granulométrie		Limite d'atterberg			Classification du sol
		<80 µm	<2 µm	ω_L %	ω_P %	I_p %	
SC73	10,72 - 11	97,28	98	51	27	24	Argile très plastique (At)
	14,2 - 14,6	93,6	52	61	32,06	28,94	Argile très plastique (AT)

3- Sondage SC74

Tableau 3,15 Résultats de l'analyse granulométrique SC74

Sondage	Profondeur (m)	Granulométrique		Limite datterberg			Classification du sol
		<80 μm	<2 μm	ω_L %	ω_P %	I_p %	
SC74	7,7 - 8,2	70,87	34	44	23,55	20,45	Argile peuoplastique (Ap)
	13,72 - 14,2	77,96	46	65	31,63	33,37	Argile très plastique (At)
	21,38 - 21,78	92,75	48	60,2	30,08	30,12	Argile très plastique (At)

4- Sondage SC75

Tableau 3,16 Résultats de l'analyse granulométrique SC75

Sondage	Profondeur (m)	Granulométrique		Limite datterberg			Classification du sol
		<80 μm	<2 μm	ω_L %	ω_P %	I_p %	
SC75	3,4 - 4	78,34	60	50,4	22,55	27,85	Argile très plastique (At)
	13,64 - 14,14	76,96	82	52,4	26,9	25,5	Argile très plastique (At)
	18,07 - 18,49	62,57	64	35,4	21,4	14	Argile peuoplastique (Ap)

5- Sondage SC76

Tableau 3,17 Résultats de l'analyse granulométrique SC76

Sondage	Profondeur (m)	Granulométrique		Limite datterberg			Classification du sol
		<80 μm	<2 μm	ω_L %	ω_P %	I_p %	
SC76	8,2 - 8,45	100	19	37,5	23,31	14,19	Argile peuoplastique (Ap)
	16,95- 17,45	100	41	54	32,37	21,63	Argile très plastique (At)
	26,1- 26,6	99,39	58	65,6	36,93	28,57	Argile très plastique (At)

6- Sondage SC77

Tableau 3,18 Résultats de l'analyse granulométrique SC77

Sondage	Profondeur (m)	Granulométrique		Limite datterberg			Classification du sol
		<80 μm	<2 μm	ω_L %	ω_P %	Ip %	
SC77	15- 15,5	100	60	52,2	31,9	20,3	Argile très plastique (At)
	16,5- 16,93	100	82	49,6	32,4	17,2	Argile peu plastique (Ap)

7- Sondage SC78

Tableau 3,19 Résultats de l'analyse granulométrique SC78

Sondage	Profondeur (m)	Granulométrique		Limite datterberg			Classification du sol
		<80 μm	<2 μm	ω_L %	ω_P %	Ip %	
SC78	7- 7,5	98,52	31	46	21	25	Argile peu plastique (Ap)
	12,5- 13	81,7	41	36	16	20	Argile peu plastique (Ap)

8- Sondage SC79

Tableau 3,20 Résultats de l'analyse granulométrique SC79

Sondage	Profondeur (m)	Granulométrique		Limite datterberg			Classification du sol
		<80 μm	<2 μm	ω_L %	ω_P %	Ip %	
SC79	8- 8,37	82,39	29	37	16	21	Argile peu plastique (Ap)
	12,45- 12,85	82,71	48	41	20	21	Argile peu plastique (Ap)
	26- 26,3	99,36	35	46	19	27	Argile peu plastique (Ap)
	26,6- 26,93	98,81	38	44	21	23	Argile peu plastique (Ap)
	30,95- 31,25	59,17	37	35	11	23	Argile peu plastique (Ap)

3.5.2. Zone II – Puits de ventilation 9

1- Sondage S43 :

Tableau 3,21 Résultats de l'analyse granulométrique S43

Sondage	Profondeur (m)	Granulométrique		Limite datterberg			Classification du sol
		<80 μm	<2 μm	ω_L %	ω_P %	I_p %	
S43	4,6 - 4,9	77,93	51	56	18	38	Argile très plastique (At)
	20,10 - 20,40	91,47	47	45	17	28	Argile peu plastique (Ap)

2- Sondage S45 :

Tableau 3,22 Résultats de l'analyse granulométrique S45

Sondage	Profondeur (m)	Granulométrique	Limite datterberg		Classification du sol
		Pourcentage <80 μm (%)	ω_L (%)	I_p (%)	
S45	8,5- 9	86,4	42	23	Argile peu plastique (Ap)
	13- 13,5	77,56	42	25	Argile peu plastique (Ap)
	16,10- 16,40	70,6	52	32	Argile très plastique (At)

3- Sondage SC80

Tableau 3,23 Résultats de l'analyse granulométrique SC80

Sondage	Profondeur (m)	Granulométrique		Limite datterberg			Classification du sol
		<80 μm	<2 μm	ω_L %	ω_p (%)	I_p (%)	
SC80	20,53- 21	99	43	57	29	28	Argile très plastique (At)
	26- 26,5	99	44	58	29	29	Argile très plastique (At)

4- Sondage SC81

Tableau 3.24 Résultats de l'analyse granulométrique SC81

Sondage	Profondeur (m)	Granulométrique		Limite datterberg			Classification du sol
		<80 μm	<2 μm	ω_L (%)	ω_p (%)	I_p (%)	
SC81	12,95 - 13,35	96	40	54	27	27	Argile très plastique (At)
	22 - 22,5	97	41	55	27	28	Argile très plastique (At)
	28 - 28,5	99	45	56	28	28	Argile très plastique (At)
	30,70 - 31,20	55	40	38	18	20	Argile peu plastique (Ap)
	34,10 - 34,50	42	14	36	19	17	Sable argileux mal gradué (Sm-SA)

5- Sondage SC82 :

Tableau 3,25 Résultats de l'analyse granulométrique SC82

Sondage	Profondeur (m)	Granulométrique		Limite datterberg			Classification du sol
		<80 μm	<2 μm	ω_L (%)	ω_p (%)	I_p (%)	
SC82	6,38 - 6,85	74	54	43	21	22	Argile peu plastique (Ap)
	16,80 - 17,15	99	44	58	29	29	Argile très plastique (At)
	21,45 - 21,95	99	45	59	30	29	Argile très plastique (At)
	24,80 - 25,20	98	39	58	29	29	Argile très plastique (At)
	29,40 - 29,90	99	48	57	28	29	Argile très plastique (At)
	43,95 - 44,45	100	48	58	29	29	Argile très plastique (At)

6- Sondage SC83 :

Tableau 3,26 : Résultats de l'analyse granulométrique SC83

Sondage	Profondeur (m)	Granulométrique		Limite d'atterberg			Classification du sol
		<80 μm	<2 μm	ω_L (%)	ω_p (%)	I_p (%)	
SC83	13,89- 14,22	100	60	53	27	26	Argile très plastique (At)
	20,48- 20,85	100	39	39,6	25,65	13,95	Argile peu plastique (Ap)
	28,10- 28,60	100	48	44,2	26.2	18	Argile peu plastique (Ap)

7- Sondage SC84 :

Tableau 3.27 : Résultats de l'analyse granulométrique Sc84

Sondage	Profondeur (m)	Granulométrique		Limite d'atterberg			Classification du sol
		<80 μm	<2 μm	ω_L (%)	ω_p (%)	I_p (%)	
SC84	16,00 - 16,40	99,47	47	49	26	23	Argile peu plastique (Ap)
	23,33 - 23,92	85.58	41	46	25	11	Argile peu plastique (Ap)

3.5.3. Zone III – Station aéroport

1- Sondage S 46 :

Tableau 3.28 : Résultats de l'analyse granulométrique S46

Sondage	Profondeur (m)	Granulométrique	Limite d'atterberg			Classification du sol
		Pourcentage <80 μm (%)	ω_L (%)	ω_p (%)	I_p (%)	
S 46	3,70 - 4,00	89	43	24	19	Argile peu plastique (Ap)
	6,70 - 7,00	80	48	26	22	Argile peu plastique (Ap)
	32,10 - 32,60	81	52	27	25	Argile très plastique (At)

2- Sondage S 47 :

Tableau 3.29 : Résultats de l'analyse granulométrique

Sondage	Profondeur (m)	Granulométrie	Limite d'atterberg			Classification du sol
		Pourcentage <80 μm (%)	ω_L (%)	ω_P (%)	I_p (%)	
S 47	7,00 - 7,30	82	51	23	28	Argile très plastique (At)
	11,00 - 11,30	84	54	21	33	Argile très plastique (At)
	18,40 - 19,00	85	53	29	24	Argile très plastique (At)

3- Sondage SC 85 :

Tableau 3.30 : Résultats de l'analyse granulométrique SC85

Sondage	Profondeur (m)	Granulométrie		Limite d'atterberg			Classification du sol
		<80 μm	<2 μm	ω_L (%)	ω_P (%)	I_p (%)	
SC 85	13,00 - 13,45	89	35	49	24	25	Argile peu plastique (Ap)
	16,25 - 16,50	93	32	52	26	26	Argile très plastique (At)
	26,79 - 27,25	84	29	48	24	24	Argile peu plastique (Ap)

4- Sondage SC 86 :

Tableau 3.31 ; Résultats de l'analyse granulométrique SC86

Sondage	Profondeur (m)	Granulométrie		Limite d'atterberg			Classification du sol
		<80 μm	<2 μm	ω_L (%)	ω_P (%)	I_p (%)	
SC 86	6,60 - 7,00	75	31	45	22	23	Argile peu plastique (Ap)
	15,05 - 15,25	75	31	41	20	21	Argile peu plastique (Ap)
	28,00 - 28,50	75	33	42	21	21	Argile peu plastique (Ap)
	33,70 - 34,50	99	52	58	29	29	Argile très plastique (At)

5- Sondage SC 87 :

Tableau 3.32 : Résultats de l'analyse granulométrique SC87

Sondage	Profondeur (m)	Granulométrique		Limite d'atterberg			Classification du sol
		<80 μm	<2 μm	$\omega_L(\%)$	$\omega_P(\%)$	$I_p(\%)$	
SC 87	13,30 - 13,80	94	42	53	27	26	Argile très plastique (At)
	14,00 - 14,50	96	45	55	27	28	Argile très plastique (At)
	19,00 - 19,50	99	53	58	29	29	Argile très plastique (At)
	27,50 - 28,00	75	33	42	21	21	Argile peu plastique (Ap)
	32,70 - 33,00	75	32	41	20	21	Argile peu plastique (Ap)

6- Sondage SC 88 :

Tableau 3.33 : Résultats de l'analyse granulométrique SC88

Sondage	Profondeur (m)	Granulométrique		Limite d'atterberg			Classification du sol
		<80 μm	<2 μm	$\omega_L(\%)$	$\omega_P(\%)$	$I_p(\%)$	
SC 88	6,00 - 6,45	97	45	56	28	28	Argile très plastique (At)
	16,60 - 16,95	98	45	56	28	28	Argile très plastique (At)
	20,00 - 20,44	100	64	61	27	34	Argile très plastique (At)
	28,17 - 28,80	98	42	57	27	28	Argile très plastique (At)
	38,50 - 38,73	40	8	34	17	17	Sable argileux mal gradue (Sm-SA)

7- Sondage SC 89 :

Tableau 3.34 : Résultats de l'analyse granulométrique SC89

Sondage	Profondeur (m)	Granulométrique		Limite d'atterberg			Classification du sol
		<80 μm	<2 μm	$\omega_L(\%)$	$\omega_P(\%)$	$I_p(\%)$	
SC 89	4,67 - 5,05	97	44	56	28	28	Argile très plastique (At)
	12,00 - 12,42	95	41	55	27	28	Argile très plastique (At)
	22,90 - 23,40	98	46	58	29	29	Argile très plastique (At)

3.5.4. Zone IV – Puits de ventilation 10

1- Sondage SC 93 :

Tableau 3.35 Résultats de l'analyse granulométrique SC93

Sondage	Profondeur (m)	Granulométrique		Limite d'atterberg			Classification du sol
		<80 μm	<2 μm	$\omega_L(\%)$	$\omega_P(\%)$	$I_p(\%)$	
SC 93	13,10 - 13,50	56	45	41	21	20	Argile peu plastique (Ap)
	22,15 - 22,50	97	42	56	28	28	Argile très plastique (At)
	33,90 - 34,50	11	41	44	30	14	Sable limoneux mal gradué (Sm-SL)

2- Sondage SC 94 :

Tableau 3.36 Résultats de l'analyse granulométrique SC94

Sondage	Profondeur (m)	Granulométrique		Limite d'atterberg			Classification du sol
		<80 μm	<2 μm	$\omega_L(\%)$	$\omega_P(\%)$	$I_p(\%)$	
SC 94	19,00 - 19,50	99	35	59	29	30	Argile très plastique (At)
	23,50 - 23,90	35	11	32	16	16	Sable Argileux-Argile très plastique (SA-At)

3- Sondage SC 95 :

Tableau 3.37 Résultats de l'analyse granulométrique SC95

Sondage	Profondeur (m)	Granulométrique		Limite d'atterberg			Classification du sol
		<80 μm	<2 μm	$\omega_L(\%)$	$\omega_P(\%)$	$I_p(\%)$	
SC 95	15,98 - 16,50	100	41	43	25	18	Argile peu plastique (Ap)
	18,77 - 19,50	100	42	43	26	17	Argile peu plastique (Ap)
	24,50 - 25,00	99.22	49	47	27	20	Argile peu plastique (Ap)

4- Sondage SC 97 :

Tableau 3.38 Résultats de l'analyse granulométrique SC 97

Sondage	Profondeur (m)	Granulométrique		Limite d'atterberg			Classification du sol
		<80 μm	<2 μm	$\omega_L(\%)$	$\omega_P(\%)$	$I_p(\%)$	
SC 97	12,65 - 13,16	100	50	52	17	25	Argile très plastique (At)
	15,88 - 16,50	100	45	55.6	29.77	25.3	Argile très plastique (At)
	18,80 - 19,50	100	50	46.8	26.63	20.17	Argile peu plastique (Ap)
	23,00 - 23,34	73.65	38	36.3	29.14	14.6	Argile peu plastique (Ap)

5- Sondage SC 98 :

Tableau3.39 Résultats de l'analyse granulométrique SC98

Sondage	Profondeur (m)	Granulométrique		Limite d'atterberg			Classification du sol
		<80 μm	<2 μm	$\omega_L(\%)$	$\omega_P(\%)$	$I_p(\%)$	
SC 98	17,50 -17,85	98.9	46	53	28	25	Argile très plastique (At)
	20,73 - 21,00	52.4	32	35	16	19	Argile peu plastique (Ap)
	27,64 - 28,08	89.5	70	48	27	24	Argile peu plastique (Ap)

3.6. CONCLUSION

L'exploration des rapports géotechnique établis ,dans le cadre du projet du métro d'Alger, le long du tronçon de notre étude - Bab Ezzouar à DAR EL BEIDA, nous a permis d'abord de classer les sols existants jusqu'à une profondeur de 39m et aussi d'identifier les paramètres géotechniques issus de différents essais d'identification physique et mécanique réalisés sur des échantillons récupérés des sondages à différents niveaux.

CHAPITRE IV : MODELISATION PAR
REGRESSION DES PARAMETRES
MECANIQUES DU SOL ARGILEUX

4.1. INTRODUCTION

Les sols sont des formations géologiques issues d'un processus érosion / transport / dépôt propre à chaque matériau et à chaque localisation. Ils ont pu subir diverses évolutions et /ou transformations en fonction des conditions du milieu ; il n'est donc pas surprenant qu'ils présentent des caractéristiques physiques et/ou mécaniques différentes d'un point à un autre. Cette dispersion observée vient de leur variabilité naturelle à laquelle peuvent s'ajouter des erreurs possibles dans leur reconnaissance.

4.2. METHODE D'ETUDE

Pour arriver à une bonne analyse exploratoire des données géotechniques de la région d'étude - centre des affaires Bab Ezzouar - Dar El Beida, nous avons procédé par un tri des données déjà effectué au chapitre 3. Ce tri nous a permis d'avoir des données assez homogènes (Tableau C.1 et Tableau C.2, ANNEXE C).

La profondeur d'investigation dans la région d'étude est allée jusqu'à 50 m, ce qui correspond non seulement à la profondeur de toutes les fondations de type superficiel mais aussi aux fondations de type profond.

Une première approche serait d'explorer chacune des variables (paramètre géotechnique) en établissant :

- les statistiques descriptives, soit : la Moyenne, l'écart type, la Variance, le coefficient d'asymétrie, le coefficient d'aplatissement, le mode,...etc ;
- une image descriptive des données à travers les histogrammes, les nuages de points ;
- quantifier la variabilité des paramètres géotechniques à travers le coefficient de variation ;
- assigner des lois statistiques à chacun des paramètres géotechniques à travers les tests de conformité ;

Dans un deuxième temps, il sera exploré les relations pouvant exister entre différents paramètres géotechniques, par corrélations simples.

L'analyse en composantes principales sera utilisée dans le souci de réduire le nombre de variables et sélectionner les paramètres physiques déterminants.

Enfin, ces paramètres physiques déterminants seront utilisés dans une analyse en régression multiple pour tenter d'établir des relations entre les paramètres mécaniques, difficiles à déterminer et surtout coûteux, aux paramètres physiques très simple à identifier.

Le logiciel utilisé pour cet objectif est **Origin Pro 2016**, c'est un outil complet d'analyse de données et de mise en forme graphique fournissant tout un éventail de fonctionnalités - toutes les analyses statistiques, les régressions...etc.

4.3. DISTRIBUTIONS DES VALEURS DES PARAMETRES PHYSIQUES ET MECANQUES

L'ensemble des paramètres géotechniques (physiques et mécaniques) mesurés du sol est constitué de deux groupes :

a) les propriétés physiques à savoir la teneur en eau, la limite de liquidité , l'indice de plasticité , les poids volumiques sec et humide et des particules solides et le degré de saturation .

b) les paramètres mécaniques à savoir, la pression de préconsolidation (P_c), la résistance à la compression (q_u), les paramètres de résistance effectifs (C' et ϕ') , Indice de compression (C_c) et indice de recompression (ou de gonflement) (C_r) .

Les distributions des valeurs des paramètres mesurées ont été analysées pour l'ensemble des zones , et regroupées selon les deux classes de sol : argile faible plasticité « Ap » et argile à plasticité élevée « At ». L'étude a comporté :

- Le calcul des statistiques descriptives des distributions observées (la moyenne , l'écart type, La variance , coefficient d'asymétrie , coefficient d'aplatissement , coefficient de variation , Le mode)
- L'élaboration d'histogrammes des données relatives à chaque paramètre géotechnique
- Pour chacune des distributions obtenues, on a recherché la loi de probabilité la mieux adaptée à la distribution des valeurs mesurées des paramètres au moyen de tests statistiques de conformité qui consistent à tester la signification des lois courantes suivantes :
 - Normale
 - Lognormale
 - Gamma
 - Weibull

Les tests de conformité ont été effectués en fixant un niveau de signification α . Le choix du niveau de confiance α , dépend du risque que l'on veut prendre d'avoir une valeur fautive d'un paramètre, c'est à dire la probabilité α de faire une erreur. Une valeur $\alpha = 5\%$ a été introduite dans la plupart des études faites sur plusieurs gammes de sols, particulièrement par Lumb (1966) et Schultze (1972), et par suite nous allons adopter ce niveau de signification.

4. 4. Statistiques descriptives, Distributions et Tests de conformité

A) Argile peu plastique Ap

Ces argiles peu plastiques se trouvent à différentes profondeurs selon l'emplacement du sondage. Elles peuvent se trouver entre [2.5- 30]m de profondeur dans la zone I (station centre de affaires, Figure 3- 6) et entre [4- 30]m de profondeur dans la zone II (puits de

ventilation 9, Figure 3.7) et entre [3- 32]m de profondeur dans la zone III (Station Aéroport, Figure 3.8) et entre [13- 28]m de profondeur dans la zone IV(puits de ventilation 10 , Figure 3.9)

Une analyse statistique est effectuée sur les valeurs des différentes propriétés physiques (Tableau C.1) : teneur en eau ω , limite de liquidité ω_L , indice de plasticité I_p , les poids volumiques humide γ_h , sec γ_d et des grains solides γ_s , ainsi que les paramètres de résistance (q_u), recueillies à partir des différents rapports géotechniques qui concernent notre zone d'étude. Les statistiques descriptives sont résumées dans le Tableau 4.1.

Tableau 4.1: Statistiques descriptives des propriétés physiques et paramètres mécaniques de l'argile peu plastique

Statistique Paramètre	Nombre de valeurs	Moyenne	Mode	Ecart type	COV (%)	β_1	β_2
Teneurs en eau ω (%)	35	19.199	14	5.046	26.2	0.569	0.228
Limite de liquidité ω_L (%)	37	43.151	41	4.844	11.2	0.264	0.523
L'indice de Plasticité I_p (%)	37	21.281	21	3.343	15.7	-0.165	0.368
Poids volumique des particules solides γ_s (KN/m ³)	32	26.015	26	0.541	2.08	- 0.180	- 0.770
Poids volumique humide γ_h (KN/m ³)	37	20.857	19,7	0.929	4.45	- 0.495	0.494
Poids volumique Sec γ_d (KN/m ³)	37	17.554	17	1.379	7.86	- 0.449	0.146
Degré de saturation S_r (%)	35	95.02	95	8.919	9.38	- 0.742	0.453
les éléments < 2 μ m (%)	33	41,36	31	9,423	22.7	0,854	0,962
Résistance à la compression simple q_u (kPa)	22	387,992	375	188,456	48.5	0,167	-0,491
COV : Coefficient de Variation ; β_1 : Coefficient d'asymétrie ; β_2 : Coefficient d'aplatissement							

Les distributions des valeurs de chacun des paramètres géotechniques sont données par la figure 4.1 , Des tests de conformité aux lois statistiques continue sont été effectués , elles comprennent le test de Kolmogorov-Smirnov, Kolmogorov-Smirnov modifié et le test de Anderson-Darling. Le test connu du χ^2 n'est pas pris en charge par le logiciel ORIGIN Pro 2016. Les résultats de ces tests sont résumés dans le Tableau C.3 (annexe c). Seules les lois qui répondent favorablement aux tests de conformité sont représentées dans la figure 4.1.

Pour résumer, on peut donc dire que les paramètres géotechniques étudiés peuvent suivre la loi normale, la loi lognormale, la loi gamma et la loi Weillbull.

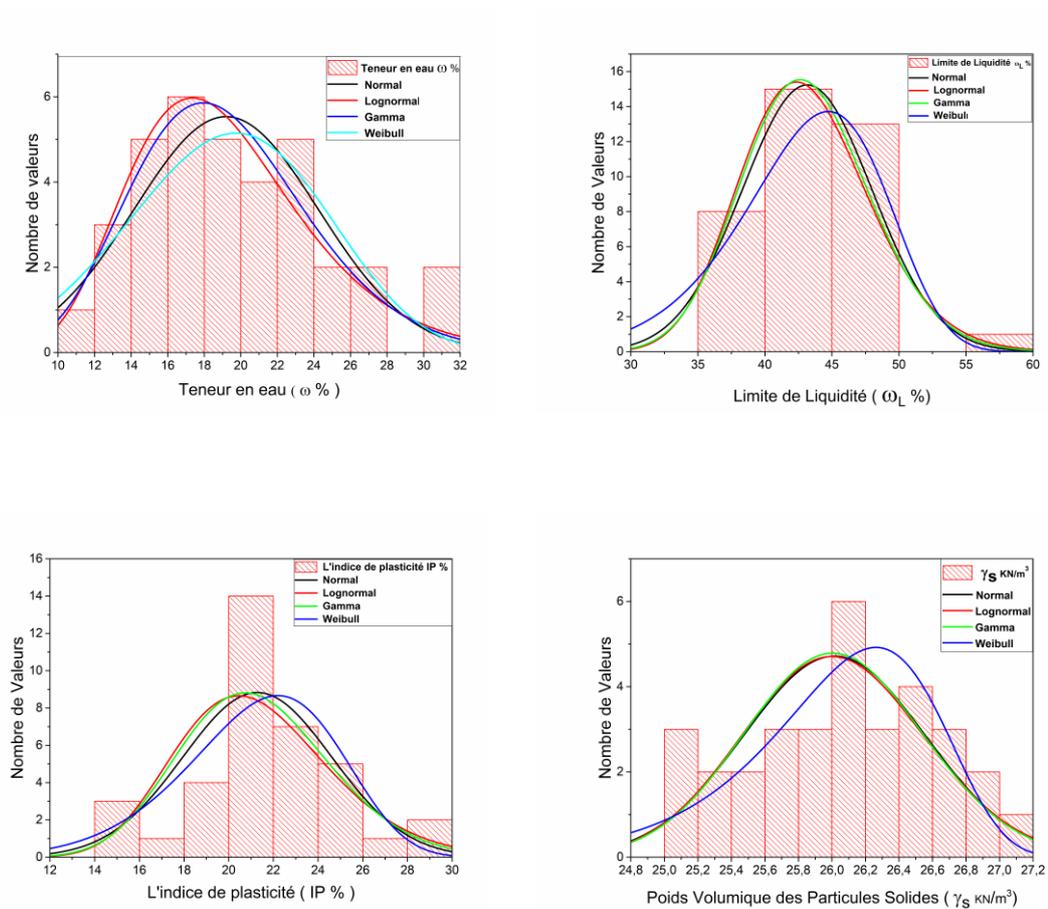


Figure 4.1 : Distributions des paramètres géotechniques et modèles de lois répondant aux tests de conformité – Argile peu plastique (Ap)

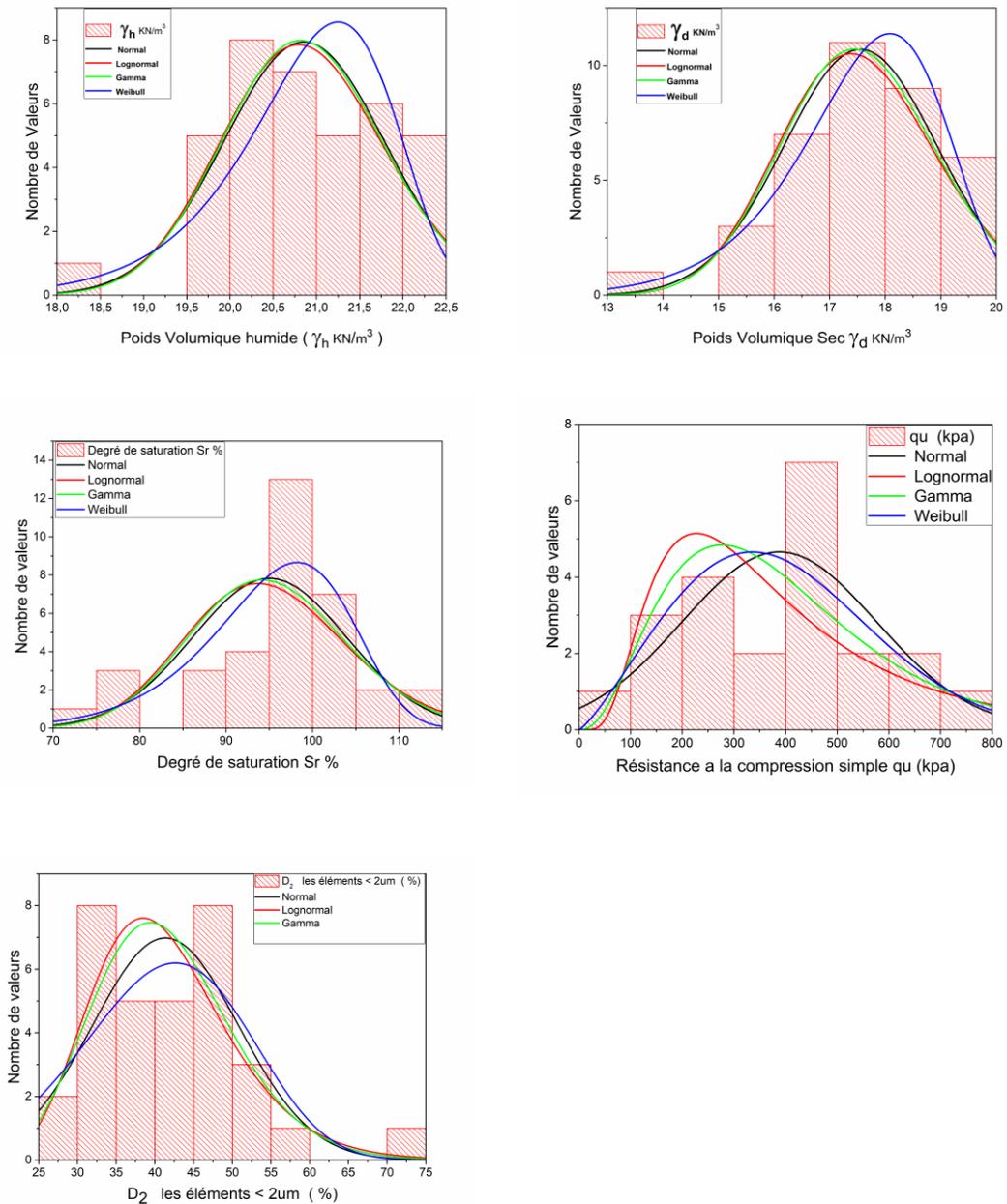


Figure 4.1 (suite) : Distributions des paramètres géotechniques et modèles de lois répondant aux tests de conformité – Argile peu plastique (Ap)

B) Argile très plastique

Ces argiles très plastiques se trouvent à différentes profondeurs selon l'emplacement du sondage. Elles peuvent se trouver entre [3.5- 30]m de profondeur dans la zone I (station centre de affaires, figure 3.6) et entre [10- 30]m de profondeur dans la zone II (puits de ventilation 9, figure 3.7) et entre [3- 30]m de profondeur dans la zone III (station aéroport, figure 3.8) et entre [10- 22]m de profondeur dans la zone IV(puits de ventilation 10, figure 3.9) .

Une autre analyse statistique est effectuée sur les valeurs des différentes propriétés physiques : teneur en eau ω , limite de liquidité ω_L , indice de plasticité I_p , les poids volumiques humide γ_h , sec γ_d et des grains solides γ_s , ainsi que les paramètres de résistance (q_u), recueillies à partir des différents rapports géotechniques qui concernent notre zone d'étude . Les statistiques descriptives sont résumées dans le Tableau 4.2.

Tableau 4.2 Statistiques descriptives des propriétés physiques et paramètres mécaniques de l'argile Très plastique

Statistique Paramètre	Nombre de valeurs	Moyenne	Mode	Ecart type	COV (%)	β_1	β_2
Teneurs en eau ω (%)	41	20.482	15	4.618	22.5	0.433	0.200
Limite de liquidité ω_L (%)	43	56.132	56	3.978	7	1.259	2.471
L'indice de Plasticité I_p (%)	43	29.208	28	3.416	11.6	1.262	2.725
Poids volumique des particules solides γ_s (KN/m ³)	32	25.837	26.1	0.539	2.08	- 0.9115	0.345
Poids volumique humide γ_h (KN/m ³)	43	20.613	20.5	1.0302	4.99	0.127	0.165
Poids volumique Sec γ_d (KN/m ³)	43	17.236	17.3	1.321	7.66	- 0.337	0.351
Degré de saturation S_r (%)	40	98.725	99	6.135	6.2	-0.440	1.675
< 2 μ m (%)	34	47,735	45	10,635	22.2	1,954	4,338
Résistance à la compression simple q_u (kPa)	24	416,802	403	266,692	63.9	1,813	3,759

COV : Coefficient de Variation ; **β_1** : Coefficient d'asymétrie ; **β_2** : Coefficient d'aplatissement

Les distributions des valeurs de chacun des paramètres géotechniques sont données par la figure 4.2. Des tests de conformité aux lois statistiques continues ont été effectués, elles comprennent le test de Kolmogorov-Smirnov, Kolmogorov-Smirnov modifié et le test de Anderson-Darling . Le test connu du χ^2 n'est pas pris en charge par le logiciel ORIGIN Pro

2016. Les résultats de ces tests sont résumés dans le Tableau C.4 (annexe c). Seules les lois qui répondent favorablement aux tests de conformité sont représentées dans la figure 4.2.

Pour résumer, on peut donc dire que les paramètres géotechniques étudiés peuvent suivre la loi normale, la loi lognormale, la loi gamma et la loi Weibull.

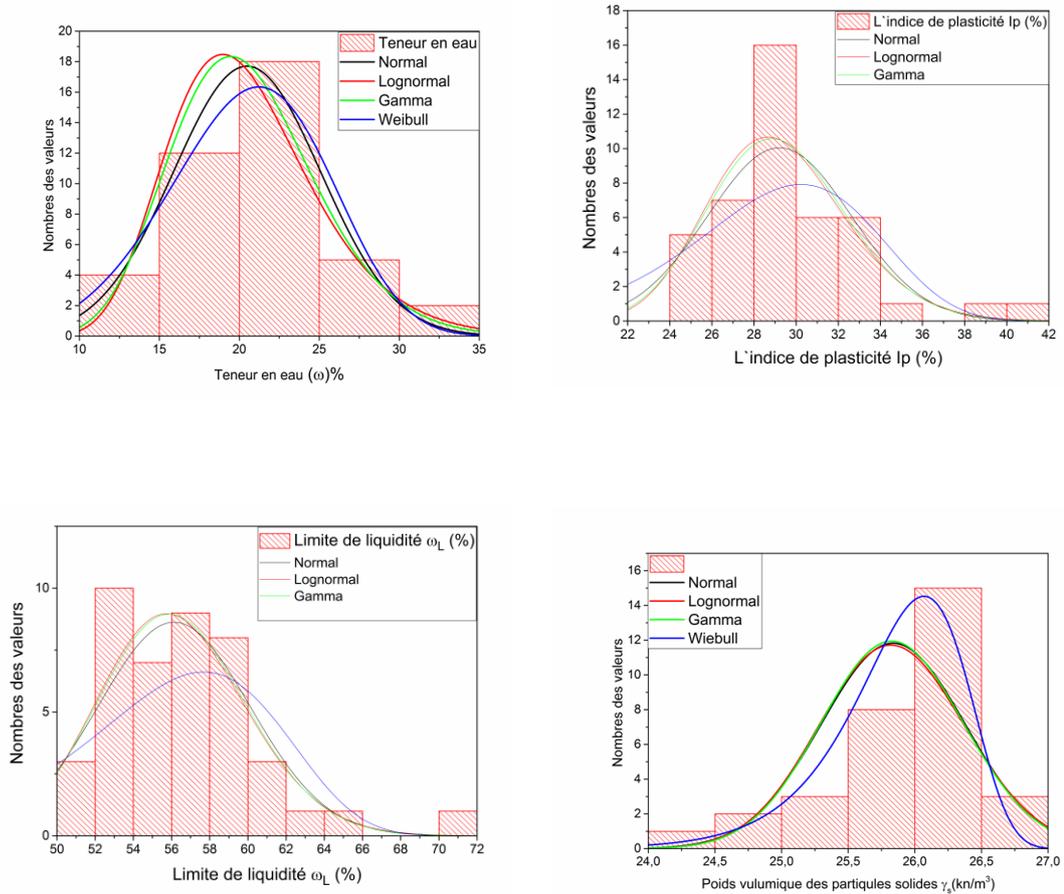


Figure 4.2 : Distributions des paramètres géotechniques modèles de lois répondant aux tests de conformité – Argile Très plastique (At)

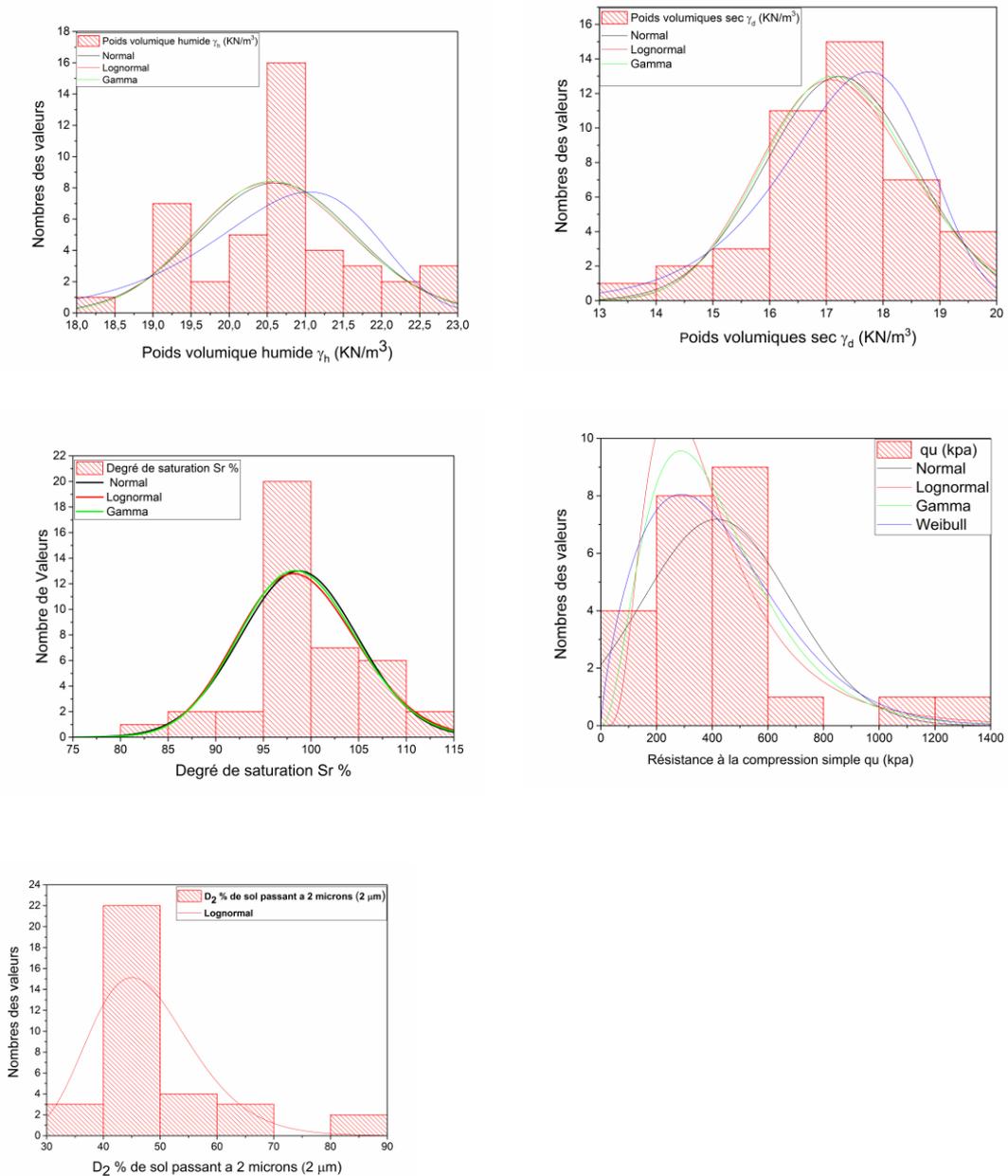


Figure 4.2 (suite) : Distributions des paramètres géotechniques et modèles de lois répondant aux tests de conformité – Argile très plastique (At)

Les tableaux 4.1 et 4.2 montrent que les statistiques descriptives de la teneur en eau et des poids volumiques sec, humide et des grains solides associées aux deux argiles Ap et At sont très similaires.

La différence se situe bien évidemment au niveau des limites d'Atterberg, pour lesquelles la limite de liquidité ω_L possède des moyennes égales à 43,15 % ($\pm 4,8\%$) et 56,13 % ($\pm 4\%$) et l'indice de plasticité I_p , des moyennes égales à 21,28 % ($\pm 3,3\%$) et 29,21 % ($\pm 3,4\%$) pour les deux argiles Ap et At, respectivement.

On relève que la limite de liquidité de l'argile peu plastique reste très élevée par rapport à la moyenne donnée par le Tableau 2.7.

L'argile très plastique montre une résistance à la compression simple plus élevée que celle de l'argile peu plastique, avec une moyenne de 416,8 kPa et un écart type relativement important (266,7 kPa) ce qui dénote une dispersion importante des valeurs que l'on peut bien voir sur l'histogramme de la figure 4.2.

De même, pour l'argile peu plastique, la moyenne de la résistance à la compression simple est de l'ordre de 388 kPa avec un écart type aussi élevé que 188,4 kPa, dispersion qu'on peut voir aisément sur la figure 4.1.

Pour les deux argiles Ap et At, les valeurs du coefficient de variation COV reste très restreint, il varie entre 7 % et 11,2 % pour la limite de liquidité, entre 11,6 % et 15,7 % pour la limite de plasticité. Les poids volumiques possèdent des COV relativement faibles variant de 2 % à 7 %. La résistance à la compression, par contre, elle enregistre un COV élevé de l'ordre de 48,5 % à 63,9 %. Toutefois, toutes ces valeurs du COV restent dans l'intervalle donné par la littérature spécialisée (Tableaux 2.1 ; 2.2 ; 2.3 ; 2.4)

4.4.1. Corrélations entre paramètres géotechniques

Les paramètres prédictifs pour les paramètres mécaniques sont tous des paramètres physiques couramment identifiés au laboratoire, il s'agit de : la teneur en eau (ω), la limite de liquidité (ω_L), la limite de plasticité (I_p), les poids volumiques humide (γ_h), sec (γ_d) et des grains solides (γ_s), le degré de saturation (S_r) et la fraction fine (le pourcentage des éléments inférieurs à 2 μm).

A noter que le choix des paramètres mécaniques s'est limité aux paramètres issus d'essais au laboratoire, à savoir : la résistance non drainée (q_u), la pression de préconsolidation (P_c), l'indice de compression (C_c), l'indice de recompression (C_r), l'angle de frottement effectif (ϕ') et la cohésion effective (C'), ces deux derniers étant issus d'essai CU au triaxial.

Les corrélations entre les différents paramètres géotechniques (physiques et mécaniques) ont été calculées et présentées dans le Tableau 4.3 on peut remarquer, à travers les valeurs du coefficient de corrélation R de Pearson obtenues, que seuls les couples de paramètres (ω_L, I_p), (γ_d, ω), (γ_d, γ_h), (γ_h, ω) présentent une forte corrélation (Tableau 4.3). Les couples de paramètres qui présentent une corrélation modérée, soit R variant de $\pm 0,3$ à $\pm 0,49$, sont ($\omega_L, <2\mu\text{m}$). On remarque que le degré de saturation S_r relatifs à pratiquement tous les échantillons de sol prélevés, est voisin de 100% (échantillons saturés), ce paramètre est donc considéré constant et par conséquent il ne sera pas pris en considération dans les analyses statistiques suivantes.

Pour tous les autres couples de paramètres, les coefficients de corrélations sont plutôt trop faibles voire même proche de zéro, indiquant ainsi une absence de corrélation linéaire entre ces couples de paramètres.

Pour avoir une image globale des corrélations des différents paramètres géotechniques entre eux, le tableau C.5 (annexe c) présente la matrice des nuages de points à tous les couples de paramètres pris deux à deux. Le seul paramètre mécanique inclus dans cette matrice est la résistance à la compression (q_u) étant que leur nombre de valeurs (mesures) pour les autres paramètres mécaniques est très réduit et n'a pas permis d'effectuer l'opération sous ORIGIN Pro 2016.

Tableau 4.3 : Matrice des coefficients de corrélation de Pearson R associés aux paramètres géotechniques du sol argileux

	Rc	ω (%)	ωL (%)	IP (%)	γs (KN/m3)	γh (KN/m3)	γd (KN/m3)	SR %	<2μm
RC	1	-0,318	0,223	0,137	0,235	0,155	0,241	-0,158	-0,141
ω (%)	-0,318	1	0,174	0,036	-0,1002	-0,692	-0,866	0,237	0,046
ωL(%)	0,223	0,174	1	0,867	-0,0129	-0,173	-0,178	0,123	0,325
Ip(%)	0,137	0,036	0,867	1	0,018	-0,111	-0,082	0,018	0,2304
γs (kN/m³)	0,235	-0,1002	-0,012	0,0185	1	0,174	0,1605	-0,370	-0,189
γh (KN/m3)	0,155	-0,692	-0,173	-0,111	0,174	1	0,896	0,242	-0,047
γd (KN/m3)	0,241	-0,866	-0,178	-0,082	0,1605	0,896	1	0,004	-0,071
SR %	-0,158	0,237	0,123	0,018	-0,3702	0,242	0,004	1	0,326
<2μm	-0,141	0,046	0,325	0,2304	-0,189	-0,047	-0,071	0,326	1

N'oublions pas que baser nos conclusions uniquement sur le coefficient de corrélation R peut être une source d'erreur, en particulier dans des situations impliquant des relations autres que linéaires entre les paramètres ou alors en présence de valeurs aberrantes. Nous

allons donc représenter en nuage de points quelques couples de ces paramètres pour éventuellement détecter une forme de relation ou une présence de valeurs aberrantes.

La Figure 4.3 donne quelques nuages de points des paramètres géotechniques (paramètre physique du sol) retenus deux à deux. L'analyse de corrélation révèle majoritairement une faible corrélation entre les paramètres géotechniques, exception faite de quelques couples de paramètres comme par exemple, l'inter-corrélation limite de liquidité / indice de plasticité paraît relativement forte ($R^2 = 0,759$). Egalement, on observe une forte liaison linéaire entre "la densité sèche" et "la densité humide" ($R^2 = 0,801$). Par contre ce qui paraît inhabituel c'est la faible corrélation ($R^2 = 0,103$) entre l'indice de plasticité et la fraction fine ($<2\mu\text{m}$) qui devaient en principe être très fortement corrélés d'après Thomas et al. (2000). Une explication possible serait les erreurs dans la détermination de la fraction fine, étant donné que cette dernière a été déterminé à partir d'un essai de sédimentation.

Pour les autres couples de propriétés physiques, on note des nuages de points épars sans toutefois montrer une quelconque tendance ou relation curviligne. Le coefficient de détermination R^2 reste cependant relativement faible.

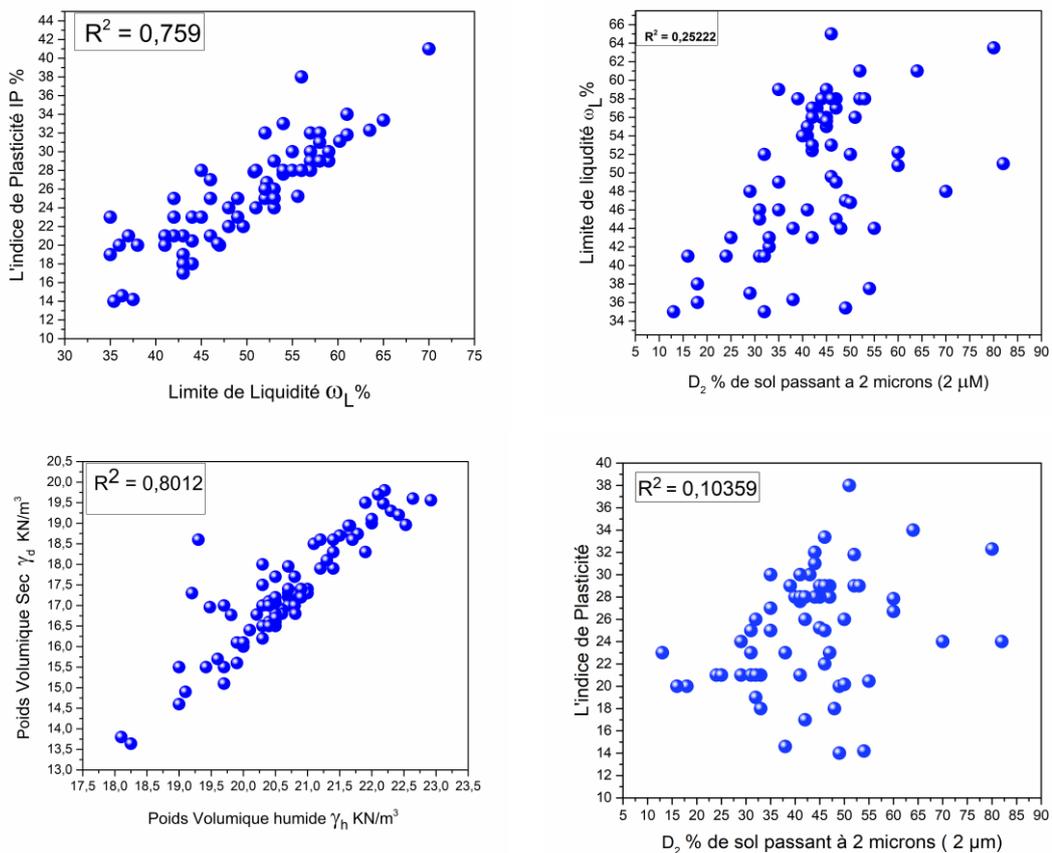


Figure 4.3 : Nuages de points de quelques couples de propriétés physiques et leurs coefficients de détermination R^2 .

Concernant les relations entre les paramètres mécaniques et les propriétés physiques, la Figure 4.4 montre quelques nuages de points représentant les paramètres mécaniques en fonction de quelques propriétés physiques. On note un nombre de valeurs (de mesures) très insuffisant pour les paramètres : angle de frottement effectif (ϕ'), indice de recompression (C_r) (de gonflement) et la contrainte de préconsolidation (P_c), ce qui ne nous permet pas de conclure sur la qualité de la corrélation entre ces paramètres.

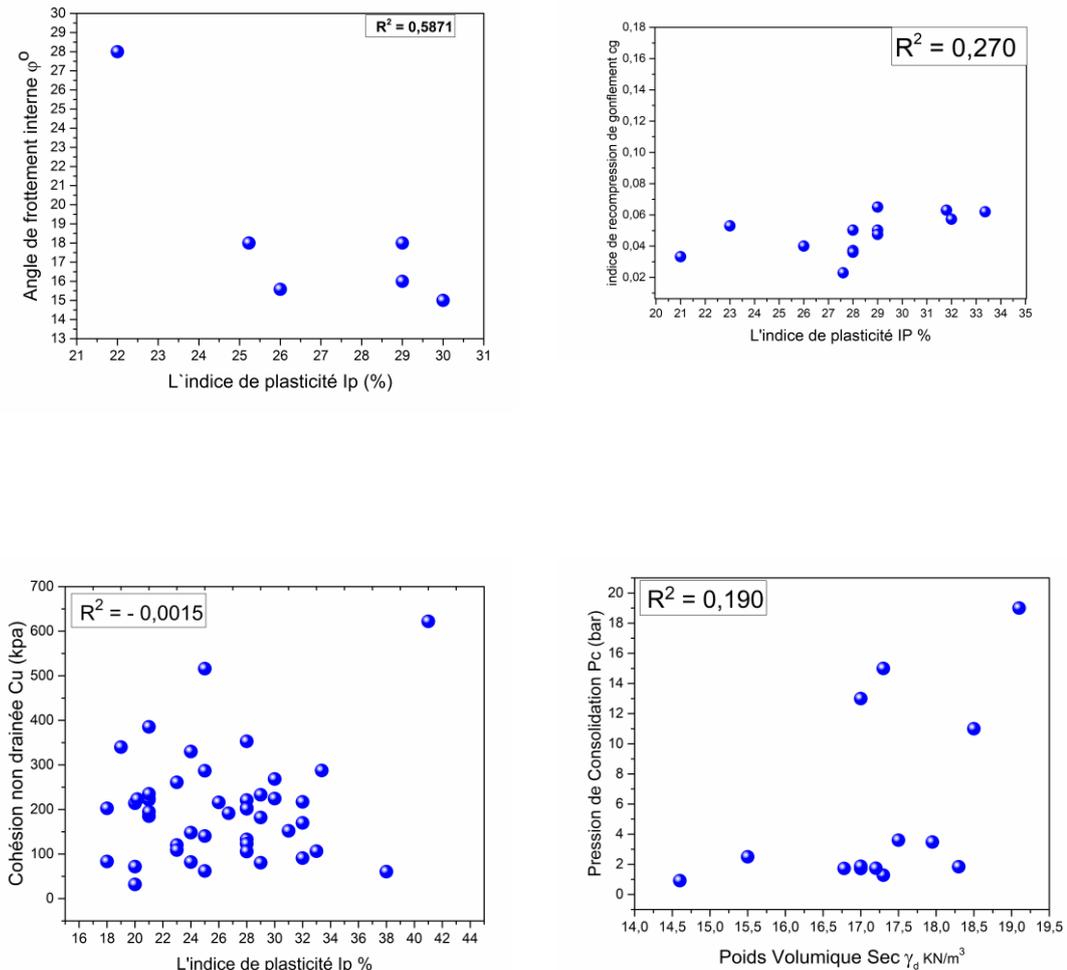


Figure 4.4 : Nuages de points de quelques couples de paramètres mécaniques et physiques et leurs coefficients de corrélation R de Pearson

4.5. ANALYSE EN COMPOSANTES PRINCIPALES DES PARAMETRES GEOTECHNIQUES

On se propose d'analyser les paramètres physiques pour les deux classes d'argile (Ap et At) en utilisant la méthode en composantes principales (ACP) afin d'étudier les corrélations qui existent entre les paramètres et extraire les composantes significatives représentant le maximum de variabilité des données.

L'analyse présentée ici porte sur l'ensemble des paramètres géotechniques déterminés sur les 81 prélèvements effectués le long de l'itinéraires retenus pour l'étude soit « Bab Ezzouar jusqu'à DAR EL BEIDA »

Rappelons-le, l'analyse en composantes principales tend à répondre à deux objectifs :

- Réduction du nombre de variables à un nombre plus petit de variables « représentatives » et « non corrélées »
- Classification des variables et individus.

La méthode d'analyse en composantes principales permet d'étudier un tableau d'individus \times variables dans le cas où toutes les variables ont des valeurs numériques. la méthode permet d'obtenir une carte des individus en fonction de leurs proximités et une carte des variables en fonction de leurs corrélations. Il est également possible d'obtenir une représentation simultanée (Biplot). La possibilité d'analyser des individus et des variables supplémentaires (quantitatives ou qualitatives) est offerte.

Les analyses en composantes principales présentées ont été réalisées au moyen du logiciel **ORIGIN Pro 2016**. Le calcul traite le tableau des valeurs des variables pour les 81 prélèvements de notre étude et fournit :

- un vecteur contenant les valeurs propres, qui expriment la variance de chaque composante principale,
- une matrice contenant les vecteurs propres, qui sont les pondérations à appliquer aux variables pour obtenir les facteurs,
- une matrice contenant les corrélations entre les variables de départ et les facteurs (utile à l'interprétation des facteurs).

La projection des individus et des variables est réalisée sur l'espace principal considéré.

En général, le(s) plan(s) factoriels sont définis par les premiers axes factoriels qui résument un pourcentage important de l'information (variance). Le choix du nombre d'axes factoriels (et donc plans factoriels) à considérer dans l'étude peut être déduit à partir du graphique de valeurs propres appelé aussi « *Scree plot* »

L'interprétation des résultats et de leurs représentations graphiques conduit aux informations suivantes :

- l'origine des axes G est le centre de gravité du nuage : il représente la tendance moyenne des individus. Les individus situés loin du centre présentent un écart important par rapport à cette moyenne et influencent beaucoup les statistiques ;

- l'inertie d'un axe, représentée par la valeur propre associée à son vecteur directeur, témoigne de la représentativité de cet axe par rapport au nuage de points : plus l'inertie du plan est forte, plus la projection du nuage sur ce plan est réaliste avec un minimum de perte d'information ;
- les coordonnées des points sur les axes factoriels sont les coefficients de corrélation des individus qu'ils représentent avec ces axes. La valeur du produit scalaire des vecteurs joignant deux points à l'origine est le coefficient de corrélation entre les deux variables correspondantes : des vecteurs voisins indiquent des variables fortement corrélées ;
- la proximité, dans le plan, d'individus et de variables n'a pas de signification. Un lien entre ces paramètres nécessite une interprétation de la signification des facteurs.

Données analysées

Les quatorze paramètres géotechniques qui ont fait l'objet de l'analyse statistique sont :

- la teneur en eau naturelle, ω (%) .
- La limite de liquidité ; ω_L (%) .
- L'indice de plasticité ; I_p (%) .
- Le poids volumique des grains solides ; γ_s (KN/m³).
- Le poids volumique humide ; γ_h (KN/m³).
- Le poids volumique sec ; γ_d (KN/m³).
- Le degré de saturation ; S_r (%) .
- Le pourcentage des éléments inférieurs à 2 μ m (particules d'argile) ; < 2 μ m.
- La pression de préconsolidation ; P_c (bar) .
- L'indice de compression vierge ; C_c (%) .
- L'indice de recompression (de gonflement) , C_g (Cg).
- La cohésion effective à partir d'un essai CU au triaxial , C' (kPa).
- L'angle de frottement effectif à partir d'un essai CU au triaxial, ϕ' (°).
- La résistance à compression simple , q_u (kPa) .

Leurs valeurs de ces paramètres géotechniques sont rassemblées dans le tableau C.1 et Tableau C.2 dans annexe c

4.5.1. Résultats de l'ACP

L'analyse a été menée en composantes principales normées et centrées, pour éliminer l'influence des ordres de grandeur des valeurs des variables analysées (certaines ont des valeurs beaucoup plus grandes que les autres et elles peuvent influencer inutilement les résultats si l'analyse est menée sur les valeurs brutes).

L'analyse en composantes principales sera effectués sur les propriétés physiques des argiles étudiés, soit les paramètres : ω , ω_L , I_p , γ_h , γ_d , et le pourcentage des éléments < 2 μ m dans l'objectif de ressortir les paramètres déterminants à utiliser dans une analyse de régression des paramètres mécaniques avec les propriétés physiques.

Le degré de saturation S_r est pratiquement égal à 100 % pour tous les échantillons analysés et le poids volumique des grains solides γ_s varie dans une gamme très étroite (de 24,4 à 27 kN/m³). Ces deux paramètres ne seront par conséquent pris en considération dans l'ACP.

A) Choix des plans factoriels

La méthode pour déterminer le nombre de facteurs à retenir (interpréter) consiste à produire le tracé de valeurs propres – *Scree plot*. Les valeurs propres successives sont représentées dans un simple tracé curviligne. Le choix des plans factoriels peut être effectué .

Le Tableau 4.4 présente les valeurs propres de la matrice des corrélations.

Tableau 4.4 : Valeurs propres de la matrice des corrélations

	Eigenvalue	Percentage of variance	Cumulative
1	2,95485	49%	49,25%
2	1,67647	28%	77%
3	0,8889	15%	92,00%
4	0,29659	5%	96,95%
5	0,11755	2%	98,91%
6	0,06565	1%	100,00%

Le diagramme du "**Scree plot**" (Figure 4.5) montre que les composantes ayant des valeurs propres supérieures à 1 (Critère de Kaiser) sont les deux premières composantes. Si on utilisait la règle du " coude ", on devrait retenir les trois premières composantes d'autant plus que dans la composante principale 3, la variable prédominante (0,928 sur la CP3) est le "pourcentage d'éléments <2 μ m" (tableau 4.7) et cela en dépit de la "relativement" faible variance exprimée par cet axe, soit 14,82 % de la variance totale.

Nous allons donc retenir les trois premières composantes principales qui totalisent 92% de variance ce qui est considéré très satisfaisant comme densité d'information. Cependant les résultats seront présentés sur le plan factoriel 1-2 uniquement.

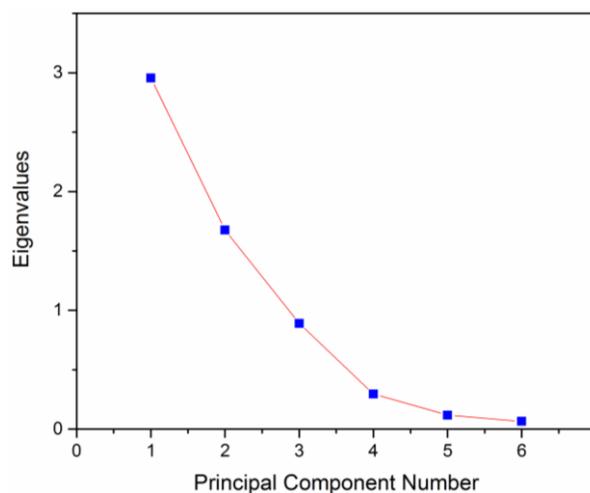


Figure 4.5 : Diagramme "Scree plot",- valeurs propres en fonction du nombre de composantes principales

B) Individus et variables de base (B iplot– plan factoriel 1-2)

Les variables de base sont représentées par des vecteurs et les individus par un nuage de points sur la Figure 4.6 On constate :

- une égale dispersion des points sur l'axe principal et l'axe secondaire ;
- une concentration des points autour du centre d'inercé ;

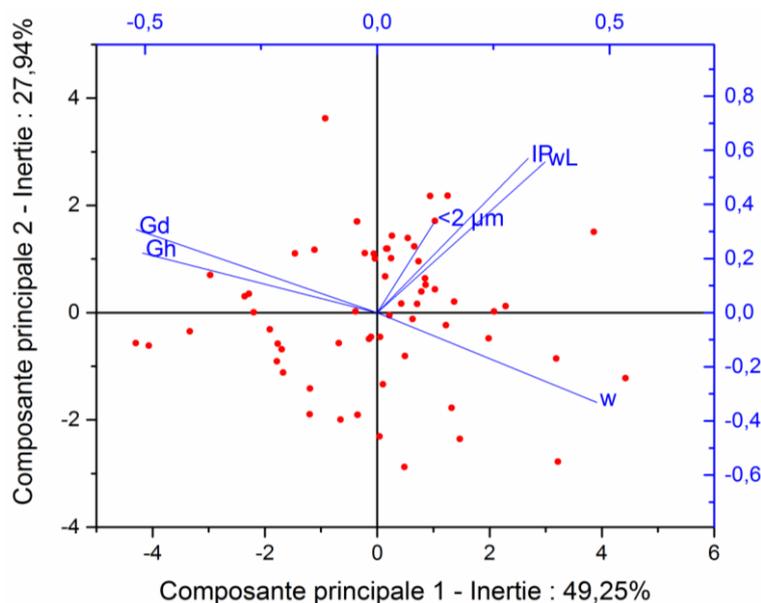


Figure 4.6: Représentation des individus et des variables de base sur le biplot factoriel 1-2

C) Représentation des corrélations des variables de base

Les variables sont représentées dans le plan des deux premiers axes factoriels sur la Figure 4.7. Les variables sont d'autant mieux corrélées aux axes principaux qu'elles sont proches du cercle. Elles sont d'autant mieux corrélées à l'axe principal (axe 1) que le point représentatif est proche de cet axe sur le cercle.

On voit ainsi que les deux variables γ_d et γ_h sont les variables les plus proches de l'axe factoriel principal (CP1), qui expliquent 25,6 % et 24,9 %, respectivement de la variance totale de l'ensemble des individus. Ces variables peuvent donc être considérées comme les mieux représentatives de la caractérisation physique du sol étudié. On remarque aussi que les deux vecteurs représentant γ_d et γ_h sont presque confondus ce qui confirme la forte corrélation entre ces deux paramètres, chose déjà révélée dans les résultats de corrélations (tableau 4.5). On note aussi que la teneur en eau naturelle (ω), est diamétralement opposée à (γ_d) et (γ_h) (Figure 4.7), ce qui est évident puisque (γ_d) est inversement proportionnelle à (ω). La teneur en eau naturelle exprime quant à elle 23,3 % de la variance totale.

Les deux vecteurs représentant les paramètres ω_L et IP sont très proches entre eux (et donc fortement corrélés) et sont aussi pratiquement perpendiculaires aux vecteurs représentant γ_d et γ_h (Figure 4.7), ce qui traduit la faible corrélation entre ces paramètres, chose révélée

aussi par le tableau 4.5 . Par ailleurs, ces paramètres sont mieux représentés sur l’AP1, ils expriment 17,8 % et 16 %, respectivement de la variance totale.

Enfin, le pourcentage des éléments inférieurs à 2µm est le mieux représenté dans l’AP3 avec une variance de 13,75% de la variance totale.

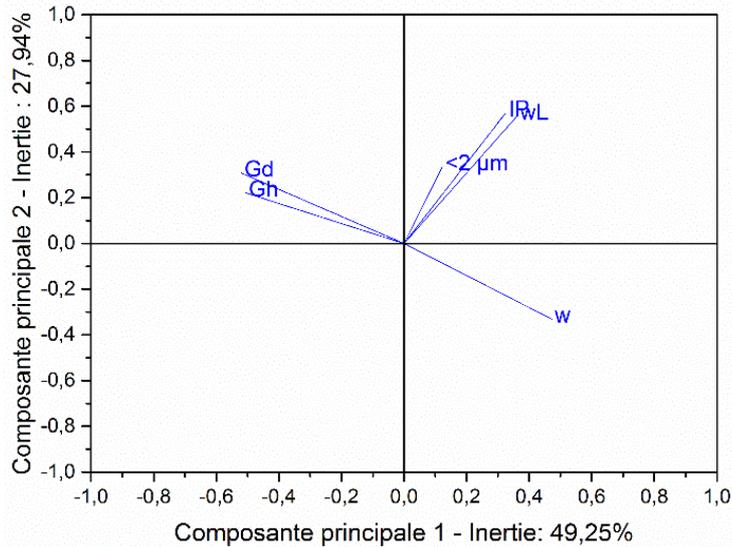


Figure 4.7 : Représentation des variables de base sur le cercle de corrélation

L’analyse factorielle fournit aussi de nombreux résultats numériques :

- coefficients de corrélation des variables deux à deux (tableau 4.5).
- les pourcentages d’inertie expliqués par chaque axe (tableau 4.6).
- les coordonnées sur les axes principaux des variables initiales (tableau 4.7).

Le tableau 4.5 donne les coefficients de corrélations entre les variables considérées. Le calcul s’est effectué en listwise*.

(*Listwise: Exclude the entire row for all datasets if there are any missing values)

Tableau 4.5 : Matrice des corrélations entre les variables (en listwise)

	W	WL	IP	γ_h	γ_d	<2 µm
W	1	0,21077	0,11378	-0,69447	-0,87427	0,04532
WL	0,21077	1	0,86995	-0,30939	-0,25527	0,292
IP	0,11378	0,86885	1	-0,28016	-0,19778	0,18599
γ_h	-0,11378	-0,30939	-0,28016	1	0,86853	-0,04655
γ_d	-0,87427	-0,25527	-0,19778	0,86853	1	-0,05584
<2 µm	0,04532	0,292	0,18599	-0,04655	-0,05584	1

Tableau 4.6 : Tableau des inerties

	Eigenvalue	Percentage of variance	Cumulative
1	2,95485	49,25%	49,25%
2	1,67647	27,94%	77,00%
3	0,8889	14,82%	92,00%
4	0,29659	4,94%	96,95%
5	0,11755	1,96%	98,91%
6	0,06565	1,09%	100,00%

Tableau 4.7 : Tableau des vecteurs propres

	coefficient of PC1	coefficient of PC2	coefficient of PC3	coefficient of PC4
W	0,47262	-0,33143	0,08614	0,6763
W _L	0,36151	0,55687	-0,1707	0,18747
IP	0,32486	0,57032	-0,314	-0,03686
γ_h	-0,50542	0,22057	0,03078	0,70836
γ_d	-0,51951	0,30705	-0,0474	0,01857
<2 μm	0,12274	0,33444	0,92825	-0,0633

4.6. MODELISATION PAR REGRESSION MULTIPLE DES PARAMETRES MECANQUES

A la lumière des résultats de l’analyse en composantes principales, nous allons tenter d’établir des relations par régression multiple de chacun des paramètres mécaniques avec les paramètres physiques déterminants.

Le choix se fera selon plusieurs combinaisons, les résultats sont donnés dans les tableaux 4.8

Tableau 4.8 : Relations par régression multiple entre les paramètres mécaniques et les paramètres physiques déterminants

	Equation de régression	Variables indépendantes	Coefficient de Corrélation ajusté R ²
qu	$qu = 5.148 I_p + 41 \gamma_d - 446.52$	I_p, γ_d	0,0283
	$qu = 2.33 I_p + 78.08 \gamma_d - 2.06 (< 2mm) - 906.79$	$I_p, \gamma_d, < 2\mu m$	0,20093
	$qu = 5.29 I_p - 25.60 \gamma_d - 23.27 \omega + 1164.15$	I_p, γ_d, ω	0,0543
	$qu = 9.05 \omega_L + 81.51 \gamma_d - 4.63 (< 2mm) - 1253.19$	$\omega_L, \gamma_d, < 2\mu m$	0,343
	$qu = 8.63 \omega_L + 100.93 \gamma_h - 5.381 (< 2mm) - 1879.54$	$\omega_L, \gamma_h, < 2\mu m$	0,293
	$qu = 7.95 I_p + 104.83 \gamma_h - 3.647 (< 2mm) - 1802.12$	$I_p, \gamma_h, < 2\mu m$	0.232
Cc	$Cc = -2.44 \gamma_d - 0.532 I_p - 0.101 \omega + 73.75$	ω, γ_d, I_p	0,365
	$Cc = 0.403 \omega_L - 1.35 \gamma_d - 0.54 (< 2mm) + 38.68$	$\omega_L, \gamma_d, < 2\mu m$	0,759
	$Cc = 0.463 \omega_L - 1.744 \gamma_h - 0.55 (< 2mm) + 48.28$	$\omega_L, \gamma_h, < 2\mu m$	0,735
	$Cc = -0.548 I_p - 1.783 \gamma_h + 0.258 \omega + 61.64$	I_p, γ_h, ω	0,344
Cg	$Cg = 0.079 \omega + 0.22 \gamma_d - 0.0603 I_p + 0.776$	ω, γ_d, I_p	- 0,318
	$Cg = 0.29 \omega_L + 0.36 \gamma_d - 0.25 (< 2mm) - 7.35$	$\omega_L, \gamma_d, < 2\mu m$	0,437
	$Cg = 0.285 \omega_L + 0.571 \gamma_h - 0.257 (< 2mm) - 11.87$	$\omega_L, \gamma_h, < 2\mu m$	0,454
	$Cg = -0.073 I_p + 0.33 \gamma_h + 0.069 \omega - 1.503$	I_p, γ_h, ω	-0,311
Pc	$Pc = -0.110 \omega + 1.992 \gamma_d + 1.18 I_p - 60.65$	ω, γ_d, I_p	0,420
	$Pc = 0.048 \omega_L + 1.947 \gamma_d + 0.452 (< 2mm) - 50.42$	$\omega_L, \gamma_d, < 2\mu m$	0,525
	$Pc = -0.036 \omega_L + 2.582 \gamma_h + 0.463 (< 2mm) - 65.579$	$\omega_L, \gamma_h, < 2\mu m$	0,509
	$Pc = 1.168 I_p + 1.743 \gamma_h - 0.361 \omega - 56.87$	(I_p, γ_h, ω)	0,421

Tableau 4.8 (suite): Relations par régression multiple entre les paramètres mécaniques et les paramètres physiques déterminants

	Equation de régression	Variabes indépendantes	Coefficient de Corrélation ajusté R ²
φ'	$\varphi' = -0.570 \omega - 2.489 \gamma_d - 1.367 I_p + 109.22$	ω, γ_d, I_p	0,242
	$\varphi' = -0.880 \omega_L + 1.553 \gamma_d + 0.667 (< 2\text{mm}) + 13.49$	$\omega_L, \gamma_d, < 2\mu\text{m}$	0,349
	$\varphi' = -0.976 \omega_L + 1.133 \gamma_h + 0.538 (< 2\text{mm}) + 26.6$	$\omega_L, \gamma_h, < 2\mu\text{m}$	0,221
	$\varphi' = -1.38 I_p - 2.833 \gamma_h - 0.397 \omega + 121.83$	I_p, γ_h, ω	0.295
C'	$C' = -7.17 \omega - 23.74 \gamma_d + 4.75 I_p + 465.33$	ω, γ_d, I_p	0,525
	$C' = 1.12 \omega_L - 9.895 \gamma_d - 3.675 (< 2\text{mm}) + 287.58$	$\omega_L, \gamma_d, < 2\mu\text{m}$	0,314
	$C' = 1.251 \omega_L - 12.82 \gamma_h - 3.364 (< 2\text{mm}) + 364.14$	$\omega_L, \gamma_h, < 2\mu\text{m}$	0,295
	$C' = 4.827 I_p - 16.18 \gamma_h - 3.767 \omega + 320.81$	I_p, γ_h, ω	0.413

On peut constater clairement que les relations qui présentent les meilleurs coefficients de corrélation ajustés (Adjusted R²) sont :

- $q_u = 9.05 \omega_L + 81.51 \gamma_d - 4.63 (< 2\text{mm}) - 1253.19$ avec Adj. R² = 0.343.
- $C_c = 0.403 \omega_L - 1.35 \gamma_d - 0.54 (< 2\text{mm}) + 38.68$ avec Adj. R² = 0.759.
- $C_g = 0.285 \omega_L + 0.571 \gamma_h - 0.257 (< 2\text{mm}) - 11.8$ avec Adj. R² = 0.454.
- $P_c = 0.048 \omega_L + 1.947 \gamma_d + 0.452 (< 2\text{mm}) - 50.42$ avec Adj. R² = 0.525.
- $\varphi' = -0.880 \omega_L + 1.553 \gamma_d + 0.667 (< 2\text{mm}) + 13.49$ avec Adj. R² = 0.349.
- $C' = -7.17 \omega - 23.74 \gamma_d + 4.75 I_p + 465.33$ avec Adj. R² = 0.525.

Pour la relation [$C_c = 0.403 \omega_L - 1.35 \gamma_d - 0.54 (< 2\text{mm}) + 38.68$], les valeurs des résidu sont montrées dans la figure 4.8. On remarque bien que les résidus sont éparpillés, selon un nuage, de part et d'autre de la droite à 0 résidu. Ces résidus restent bornés à - 0.02 et + 0.02 .

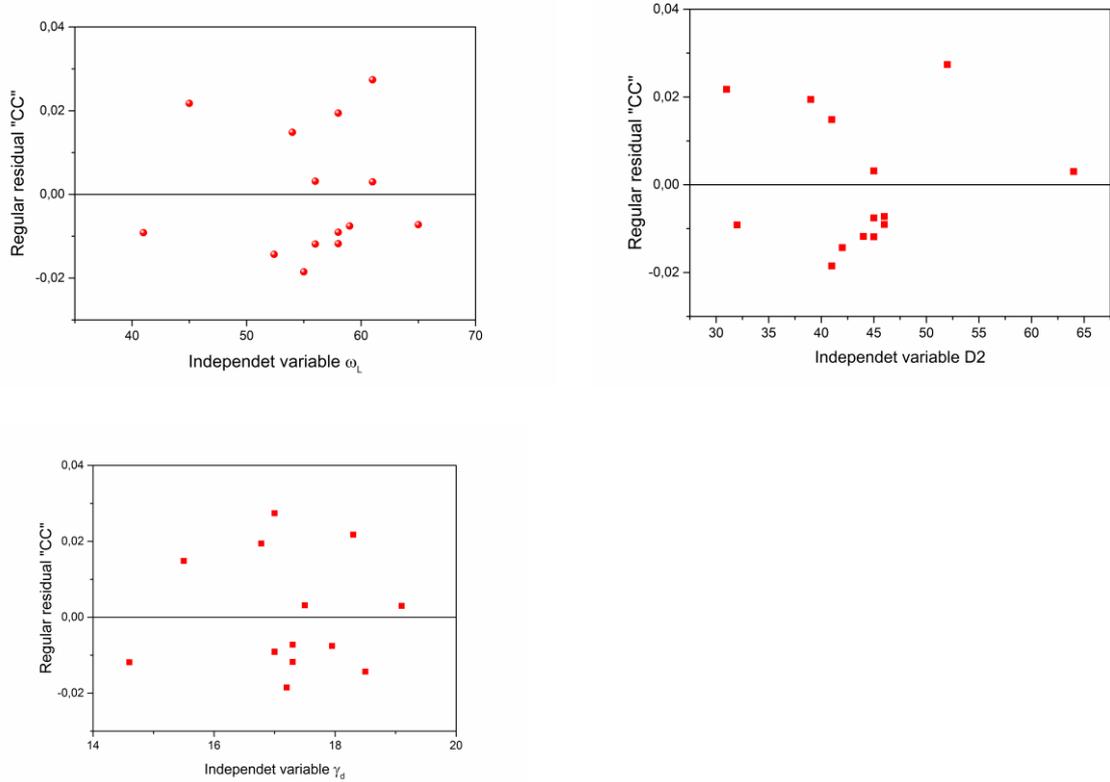


Figure 4.8 : Nuages de points des résidus pour la relation entre les paramètres mécaniques et les paramètres physiques déterminants

4.7. CONCLUSIONS

L'objectif principal de ce chapitre est bien de chercher une relation linéaire entre les paramètres géotechniques du sol étudié et d'établir un modèle multiparamétrique pour l'estimation rapide des paramètres mécaniques de sols argileux (région d'Alger). Parmi les caractéristiques physiques du sol étudié, nous avons retenu : la teneur en eau, la limite de liquidité, l'indice de plasticité, les poids volumiques des sols et la fraction fine. Les paramètres mécaniques retenus sont ceux caractérisant la compressibilité et la résistance des sols argileux mesurés directement au laboratoire. La régression linéaire simple a montré, d'un côté, une forte corrélation entre certains paramètres physiques deux à deux.

A l'issue d'une analyse en composantes principale qui a permis de ressortir les paramètres prédictifs significatifs (paramètres physiques), la régression linéaire multiple nous a permis d'établir des modèles empiriques avec des coefficients de corrélation ajustés (Adjusted R^2) plutôt moyen pour la plupart des relations établies. La seule relation qui peut être relativement plus fiable est celle qui estime l'indice de compression C_c en fonction de (ω_L , γ_d , $< 2\mu m$) avec Adj. $R^2 = 0.759$. Les valeurs de l'indice de compression mesurées sont bien proches à celles estimées, les résidus sont compris entre -0.02 et $+0.02$. Les paramètres du modèle reflètent donc sa bonne réponse. L'équation empirique du modèle peut être utilisée pour la prévision de la compressibilité des sols argileux de la région d'Alger.

CHAPITRE V : CONCLUSION GENERALE

La recherche des lois générales de comportement, la mise en évidence de structures stratigraphiques, les corrélations entre paramètres géotechniques et toutes les diverses possibilités d'exploitation des données disponibles constituent des problèmes présentant un grand intérêt pour le géotechnicien.

L'objectif principal de cette étude a été d'établir des relations qui permettent d'exprimer d'une manière rapide et fiable, les caractéristiques de compressibilité et de résistance en fonction de paramètres facile à déterminer au laboratoire et peu coûteux, soient les paramètres physiques des sols. L'alternative utilisée étant la modélisation statistique, en particulier les corrélations trouvées entre les paramètres physiques et mécaniques du sol.

Ce travail a été destiné, dans un premier temps, à dégager sur la base de résultats expérimente aux relatifs au tronçon de la ligne Bab Ezzouar jusqu'à DAR EL BEIDA , dans le cadre de la réalisation du métro d'Alger, des allures générales de comportement en définissant les formes de distribution de probabilité de tous les paramètres géotechniques, et à rechercher les relations liant certains paramètres entre eux.

Il a été procédé à l'analyse en composantes principales, dans l'objectif d'identifier les paramètres physiques significatifs à la modélisation des paramètres mécaniques des sols argileux de la région d'Alger. Le cas d'application traité n'avait d'autre ambition que de servir d'exemples pour l'illustration de cette approche. On ne peut tirer nécessairement de cet exemple des lois générales de comportement applicables mais simplement de montrer la méthodologie de modélisation. Les modèles de comportement par lesquels les comportements observés sont décrits et quantifiés ne sont dans la plupart des cas que phénoménologiques.

Toutefois, il faudrait s'attendre à ce que les impératifs économiques conduisent à l'adoption de plus en plus large de ce type d'approche pour tous les projets d'une certaine envergure.

L'avenir d'une telle approche en mécanique des sols serait de multiplier les recherches pour mieux évaluer l'influence de la dispersion naturelle des propriétés physiques et mécaniques des sols sur leur comportement observé. Ainsi, ces recherches pourraient développer des méthodes pratiques d'applications pour les problèmes quotidiens des praticiens, méthodes s'appuyant sur ce schéma général d'approche.

L'approche proposée n'est pas limitée à ce domaine particulier, mais elle fournit un cadre pour l'analyse, ainsi que des méthodes de calcul applicables à pratiquement tous les domaines de l'art de l'ingénieur. Dans cette optique, il serait intéressant de souligner que les méthodes déterministes resteront toujours indispensables pour exprimer par leurs équations les lois fondamentales des phénomènes physiques et que ces deux outils se complètent et sont indispensables dans la plupart des disciplines.

L'objectif du présent travail est de montrer que l'adoption de ce type d'approche résulte d'une observation objective des phénomènes naturels et d'une analyse fondée sur un raisonnement logique, particulièrement en mécanique des sols, domaine où l'incertitude sur les propriétés et les lois de comportement des matériaux est, et restera toujours très élevée

- LISTES DES REFERENCES -

- **Baecher G.B., Christian J. T. (2003).** Reliability and Statistics in Geotechnical Engineering. John Wiley and Sons Ltd., 605p
- **Benjamin J.R., Cornell C. A. (1970).** Probability, statistics and decision for civil engineers. New York, Mc-Graw-Hill Book Company, 684p
- **Holtz R.D., et Kovacs W.D (traduit par Jean Lafleur), 1996** Introduction à la Géotechnique Edition de l'École Polytechnique de Montréal.
- **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.
- **VANMARCKE, E. H.,(1983)** Random Fields Analysis and Synthesis, The MIT Press, Combridge Mass.
- **VANMARCKE,E.H,(1977a)** Probabilistic Modeling of Soil Profiles , Journal of Geot, Div,ASCE, Nov. 1977.
- **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
- **MAGNAN, J.P.,BAKI,A.A.,POUCET,P.(1993)** Analyse probabiliste de la stabilité de deux remblais sur versant instable du site expérimental de Sallédes. Etudes et recherches L.P.C n° 56.
- **Claude Bouchu , 1969 .** Dominique Pepin. Claude Bouchu et le mot " statistique ".Journal de la Societe Française de Statistique, Societe Française de Statistique et SocieteMathematique de France, 2005, 146 (4), pp.119- 129. fihal-00986920f
- **Digabel , 2017.** Elodie Chapoulade. Optimisation de l'instrumentation pour le suivi et l'évaluation de l'état des alvéoles de stockage de déchets radioactifs. Génie civil. Université Clermont Auvergne [2017-2020], 2019. Français. fFNNT : 2019CLFAC049ff. fftel-02513165.
- **Immediato, H., 2010.** « Cours statistiques », note de cours : Lyon : Université Claude Bernard de Lyon.
- **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).
- **Cibois, P., 2006.** « Principe de l'analyse factorielle », note de cours : université de Versailles, Paris.
- **HARR,E.,(1977)** Mechanics of Particulate Media.A Probabilistic.Mc Graw-Hill.
- **LUMB,P.,(1966)** The Variability of Natural Soils, Can. Geot.,Journal, Vol 3,n°.
- **LUMB,P.,(1970)** Safety Factors and the Probability Distribution of soil Strength, Can.Geot. Journal, Vol 7,n°3.
- **BIAREZ,J.,FAVRE,J.-L.,(1977)** The Probabilistic Approach to Soil Mechanics Design : Statistical Estimation and Extrapolation from Observations, S pec. Session 6, 9 th ICSMFE, Tokyo.
- **MATSUO , M., ASAOKA , A. , (1977)** Statistical Model Identification of Undrained Strength of Saturated Clay, IX ICSMFE Session Speciale n°6,Tokyo.
- **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.

- LES ANNEXES -

- ANNEXE A-

A.1. VARIABLE ALEATOIRE REDUITE

Elles sont définies sous forme adimensionnelle:

$$T = \frac{x-m}{\sigma} \quad (\text{A.1})$$

Elles ont pour espérance mathématique zéro et pour variance 1.

A.2. COEFFICIENT DE VARIATION

$$Cv = Cx = \frac{\sigma}{m} \quad (\text{A.2})$$

Facteur adimensionnel utile . Il permet de relier x et T par la formule: $x = m(1 + Cx T)$ et de - présenter le degré d'incertitude d'une variable aléatoire.

A.3. COEFFICIENTS DE FORME

Les moments centrés d'ordre trois et quatre donnent des informations sur la forme de la densité de probabilité .Souvent , ils sont présentés sous forme adimensionnelle :

$$\sqrt{\beta_1} = E (T^3) = \frac{\mu_3}{\sigma^3} \quad (\text{A.3})$$

$$\beta_2 = \frac{\mu_4}{\sigma^4} \quad (\text{A.4})$$

A .3.1.Coefficient d'asymétrie: β_1

β_1 est appelé coefficient de dissymétrie ou d'asymétrie . Il mesure l'asymétrie d'une distribution

- si la distribution est symétrique par rapport à l'espérance mathématique, $\sqrt{\beta_1} = 0$

- si la distribution est asymétrique , $\sqrt{\beta_1}$ peut être positif ou négatif suivant le signe de μ^3 .

- Pour la loi normale, $\beta_1 = 0$ et $\beta_2 = 3$.

A.3.2. Coefficient d'aplatissement: β_2

Le coefficient β_2 donne une indication sur la façon dont la distribution est concentrée autour de sa moyenne, de faibles valeurs de β_2 impliquant des courbes plus plates pour la densité de probabilité.

A.4. INTERVALLES ET NIVEAUX DE CONFIANCE

En plus de l'estimation de la valeur d'un paramètre θ à partir d'un ensemble d'observations, on peut effectuer une estimation de l'incertitude associée à la valeur retenue. L'intervalle de confiance du paramètre θ est un intervalle $[T1, T2]$ qui vérifie pour une valeur donnée du paramètre a l'équation:

$$\text{Prob } [T1 < \theta < T2] = 1 - \alpha \quad (\text{A1.5})$$

α : appelé seuil de signification. Cette valeur comprise entre 0 et 1, représente la probabilité que θ tombe à l'extérieur de l'intervalle $[T1, T2]$.

$(1-\alpha)$: appelé seuil de confiance de l'intervalle $[T1, T2]$.

Remarque: dans le cas où l'une des limites de l'intervalle est infinie, on parle d'intervalle de confiance unilatéral.

A.5. SYSTEME DE PEARSON

K.PEARSON découvrit que la plupart des densités de probabilité $g(x)$ classiques peuvent être générées à partir de l'équation différentielle :

$$\frac{dg(x)}{dx} = \frac{(a_0+x)g(x)}{b_0+b_1x+b_2x^2} \quad (\text{A.6})$$

dans laquelle: a_0, b_0, b_1, b_2 sont des constantes. Le système de PEARSON est particulièrement important, du fait de l'existence d'un paramètre K appelé critère qui s'exprime en fonction des quatre premiers moments de $g(x)$ (HARR, 1977).

$$K = \frac{\beta_1(\beta_2+3)^2}{4(2\beta_2-3\beta_1-6)(4\beta_2-3\beta_1)} \quad (\text{A.7})$$

$\sqrt{\beta_1}$ et β_2 : étant respectivement les coefficients d'asymétrie et d'aplatissement..

PEARSON a défini trois types de courbes, d'après les valeurs de K :

- $K < 0$: correspond à la distribution bêta de type I
- $0 < K < 1$: courbes généralement asymétriques et non bornées des deux côtés de type IV
- $K > 1$: distributions bornées d'un côté, type VI

Il existe toutefois des distributions de transition entre les différents types:

- Pour $K = 0, \beta_1 = 0$ et $\beta_2 = 3$: distribution normale.
- Pour $K = 0$ et $\beta_2 > 3$: distribution de Student de type VII
- Pour $K = 0$ et $\beta_2 < 3$: distribution de Student de type II
- Pour $K = \pm \infty$: distribution de χ^2 et exponentielle de type III
- Pour $K=1$: généralisation de la distribution lognormale de type V

A.6. DISTRIBUTIONS DES PARAMETRES GEOTECHNIQUES

On distingue 2 types de distributions :

A.6.1. Distribution empirique

Une distribution empirique est la distribution d'une série d'observations expérimentales qui ne sont rien d'autres que des résultats d'essais ,à partir desquels, il faut tirer un schéma de calcul en partant d'une analyse qui consiste à étudier la distribution des valeurs mesurées pour chaque propriété du sol, sans se soucier de leur localisation dans l'espace.

L'analyse des résultats d'une telle série se fait de la façons suivante :

1°/ On classe les données par ordre croissant pour pouvoir distinguer la valeur minimale et la valeur maximale.

2°/ On partage l'étendue de l'observation en classes de même amplitude, de façons à ce que le nombre de classes soit compris entre 5 et 20.

3°/ On compte le nombre d'observations dans chaque classe. Les résultats sont traduits par un histogramme, ou l'on porte en abscisse les valeurs du paramètre étudié et en ordonnée les effectifs de chaque classe.

A.6.2. Distributions théoriques

L'utilisation des lois de distributions empiriques n'est pas très pratique ,pour cette raison ,on essaiera toujours d'ajuster la loi observée par l'une des lois théoriques connues (loi normale, loi lognormale ,loi bêta,...)

A.7. TESTS STATISTIQUES DE CONFORMITE

Ce sont des procédés qui permettent de décider si des hypothèses sont vraies ou fausses. Ils permettent d'évaluer le risque d'erreur associé au rejet d'une hypothèse: « l'hypothèse nulle».

L'idée de base est de choisir deux hypothèses qui s'excluent l'une de l'autre sur la valeur du paramètre de la population.

Il existe différents types de tests statistiques, on s'intéressera notamment au test du χ^2 (chi-deux) qui est bien adapté au cas d'échantillons importants ($n > 30$).

A.7.1 Test du χ^2

Ce test utilise une fonction des observations sur un échantillon qui suit une loi de χ^2 lorsque l'hypothèse nulle est vraie. La procédure est la suivante:

Les n valeurs de la variable aléatoire observées dans un échantillon sont regroupées en k classes, de x_0 à x_1 , de x_1 à x_2 ,...de x_{k-1} à x_k , et le nombre n_i des observations qui tombent dans chaque classe i est compté. On calcule ensuite le nombre e_i théorique (d'après la distribution supposée) des éléments de chaque classe i , soit :

$$e_i = n [G(x_i) - G(x_{i-1})] \quad (A.8)$$

puis l'on calcule la valeur de D_1 , égale à:

$$D_1 = \sum_{i=1}^k \frac{(n_i - e_i)^2}{e_i} \quad (\text{A.9})$$

On démontre que la quantité D_1 a une loi de distribution très proche d'une distribution χ^2 à $(k - r - 1)$ degrés de liberté, n étant le nombre de paramètres statistiques à estimer selon la loi utilisée. La condition $e_i > 5$ est généralement admise.

L'hypothèse soumise au test est que la loi de distribution des observations n_i est la loi théorique qui a servi à calculer les n_i . On choisit un niveau de signification α tel que :

$$\Pr [D_1 > \chi^2] = \alpha \text{ et l'on rejette l'hypothèse si : } D_1 > \chi^2 \alpha .$$

α représente donc le risque de rejeter l'hypothèse quand elle est vraie. La valeur de $\chi^2 \alpha$ est prise dans une table de valeurs.

A.7.2 Test d'adéquation de Kolmogorov-Smirnov

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 (Benjamin et Cornell, 1970). En supposant que toute régularité obtenue à partir des observations est suivie, nous posons les hypothèses de test suivantes :

H_0 : X suit la loi F

H_1 : X suit une autre loi.

Kolmogorov propose la statistique de test suivante

$$D_n = \sup | f_n(x) - f(x) | \quad (\text{A.10})$$

A.8. CORRELATIONS

A.8.1. Analyse de régression multiple

Les modèles linéaires dans lesquels, la variable aléatoire expliquée Y dépend linéairement d'une ou plusieurs variables aléatoires (explicatives) X_i , les autres variables pouvant être aléatoires ou non, ont pour forme générale:

$$Y = \sum_{j=1}^k (\beta_j X_j + \beta_0) \quad (\text{A.11})$$

Sous forme matricielle le problème consiste à déterminer la matrice colonne β . L'estimation des paramètres β_j correspondant sur la base de n observations effectuées sur les k variables indépendantes X_j et la variable dépendante Y s'effectue généralement par la méthode des moindres carrés.

Kendall et Stuart (1961) formulent cette méthode sous forme matricielle suivant

Soit :

Y: la matrice-colonne des n observations de y

X: la matrice n (k+1) des n observations des kX_i

β : la matrice colonne des (k+1) coefficients cherchés β_i

ε : la matrice des résidus, de la relation ci-après :

Les observations des X_i et Y se traduisent par l'équation matricielle :

$$Y = X \cdot \beta + \varepsilon \quad (\text{A.12})$$

La méthode des moindres carrés qui sert à estimer les valeurs des β_i, consiste à minimiser l'expression $\varepsilon^T \cdot \varepsilon$. On montre que cela conduit à :

$$\beta = (X^T \cdot X)^{-1} \cdot X^T \cdot Y \quad (\text{A.12a})$$

La variance de l'estimateur β peut être calculée de la façon suivante :

La matrice V [β] est une matrice carrée (k+1) x (k+1) d'élément courant σ_{β_iβ_j} (covariance des variables aléatoires β_i et β_j). Elle est égale à:

$$V [\beta] = V [\varepsilon] (X^T \cdot X)^{-1} \quad (\text{A.12b})$$

Avec :

$$V [\varepsilon] = \frac{1}{n - k - 1} Y^T \cdot Y - B^T \cdot X^T \cdot Y$$

Le coefficient de corrélation multiple a pour expression:

$$R = \sqrt{\frac{V^T_{xy} V^1_{xy} \cdot V_{xy}}{V_{yy}}} \quad (\text{A.12c})$$

Il constitue une mesure de la validité de la régression effectuée entre Y et X₁. La validité de la relation :

$$Y = \sum_{j=1}^k \beta_j X_j \rightarrow \text{augmente quand } R \rightarrow 1$$

avec les notations suivantes :

- V_{xx} : est la matrice des covariances des variables explicatives X_i.
- V_{yy} : est la variance de la variable expliquée Y.

- V_{xy} : est le vecteur-colonne des covariances de la variable expliquée avec chacune des variables explicatives.

On calcule ces matrices à l'aide des formules suivantes :

$$V_{yy} = \frac{1}{n} Y^T \cdot Y \quad (\text{A.12d})$$

$$V_{xy} = \frac{1}{n} X^T \cdot Y \quad (\text{A.12e})$$

$$V_{xx} = \frac{1}{n} Y^T \cdot X \quad (\text{A.12f})$$

Le symbole (\wedge) indique qu'il s'agit de la matrice centrée correspondante; c'est à dire:

$$X = X - \bar{X}$$

(\bar{X} est la matrice dont chaque colonne a pour valeur la moyenne de la variable de la colonne correspondante)

- Test de Fisher-Snedecor

Si le nombre de variables explicatives est p , la valeur de :

$$F = \frac{R^2/P}{\frac{1-R^2}{n-p-1}} \quad (\text{n=nombre d'échantillons}) \quad (\text{A.13})$$

suit une distribution de Fisher-Snedecor de degrés de liberté p au numérateur et $n - p - 1$ au dénominateur.

Si F_{oy} est la valeur de F associée à la probabilité γ (fractile d'ordre γ) la régression est significative au seuil de γ % pour au moins une des variables explicatives si la condition suivante est remplie: $F > F_{\text{oy}}$.

A.8.2. Régression linéaire

Dans le cas d'une variable X unique, les coefficients α et β de la relation :

$$Y = \alpha + \beta X \quad (\text{A1.14})$$

sont choisis de telle manière que : $\sum (Y - \beta X - \alpha)^2 = \text{minimum}[]$

c'est la méthode des moindres carrés qui consiste à rendre minimum la somme des carrés des distances verticales entre les points expérimentaux et les points correspondant sur la droite.

Pour estimer des coefficients α et β , on utilise les formules :

$$\alpha = \bar{Y} - \beta \bar{X} \quad (\text{A.15})$$

$$\beta = \frac{\sum_{i=1}^n X_i y_i - n \bar{X} \bar{Y}}{\sum_{i=1}^n X_i^2 - n \bar{X}^2} = \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_x^2} \quad (\text{A.16})$$

\bar{X} et \bar{Y} sont les valeurs moyennes observées de x et y.

La variance de la régression, σ_ε^2 est donnée par la formule :

$$\sigma_\varepsilon^2 = \sum_{i=1}^n [y_i - (\alpha + \beta x_i)]^2 \quad (\text{A.17})$$

Les estimateurs α et β ont pour variance:

$$\sigma_\beta^2 = \frac{\sigma_\varepsilon^2}{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} = \frac{\sigma_\varepsilon^2}{n \sigma_x^2} \quad (\text{A.18})$$

$$\sigma_\alpha^2 = \frac{\sigma_\varepsilon^2}{n} \left[1 + \frac{\bar{X}^2}{\sigma_x^2} \right] \quad (\text{A.19})$$

Et pour covarianc

$$\sigma_{\alpha\beta} = - \frac{n \sigma_\varepsilon^2}{\sigma_x^2} \quad (\text{A.20})$$

Rappelons que la covariance est une mesure de la tendance des deux à être liées dans leur variation

A.9. Coefficient de corrélation:

Le coefficient de corrélation R est défini par :

$$R = \frac{COV(x, y)}{\sigma_x \sigma_y} \quad (\text{A.21})$$

σ_x^2 et σ_y^2 , sont les variances de l'échantillon:

- $R= 1$: Corrélation parfaite entre deux variables dans la même direction.
- $R = -1$: Corrélation parfaite entre deux variables en directions opposées.
- $-1 < R < 1$: Dispersion d'un certain degré.
- $R = 0$: Corrélation faible.
- $R= 1$: Degré de corrélation élevé .

A.10. Test de signification :

La distribution des paramètres α et β suit une loi de Student. Pour un niveau de signification donné, on pourra décider si la relation doit être établie avec les deux coefficients α et β ou l'un deux

seulement. On prendra $\alpha = 0$, comme hypothèse nulle, puis $\beta = 0$ et on applique les tests de conformité dans le cas de la loi de Student (Cornell 1972, Lebart et Fenelon 1973).
 Pour une valeur donnée de $x = x_0$, la moyenne et la variance de la variable aléatoire Y sont:

$$E(Y_{x_0}) = \alpha' + \beta'_{x_0} \quad (\text{A.22})$$

$$\sigma_{Y_{x_0}}^2 = \frac{\sigma_\varepsilon^2}{n} \left[1 + \frac{(X_0 - \bar{x})^2}{\sigma_x^2} \right] \quad (\text{A.23})$$

A.11. Tests de signification des coefficients de s relations de régressions multiples

La distribution des valeurs réduites b_i des paramètres β_i des lois de régression multiple :

$$b_i = \frac{\beta'_i - \beta_i}{\sigma_{\beta_i}} \quad (\text{A.24})$$

(β_i : valeur réelle de β_i et β'_i : valeur estimée de β_i et σ_{β_i} : écart type de β'_i égal à la racine carrée du terme diagonal de rang i de la matrice $V[\beta]$ définie précédemment) suit une loi t de Student à $(n - p - 1)$ degrés de liberté (n : nombre de valeurs observées des variables $\{ Y_i X_i \}$; P : nombre des variables explicatives X_i).

On peut tester en utilisant cette loi, si les valeurs des paramètres β_i sont différentes de zéro de façon significative (Lebart et Fénelon, 1973).

Le test a lieu sur l'hypothèse nulle « $\beta_i = 0$ » : on compare la valeur calculée de $\beta_i = \beta'_i / \sigma_{\beta_i}$ à la valeur de $t_{1-\alpha}$ (lue dans une table) telle que:

$$\text{Prob} \ll t > t_{1-\alpha} \gg = 1 - \alpha \quad (\text{A.25})$$

Si pour le niveau de signification α choisi, on a $\beta_i > t_{1-\alpha}$, il faut rejeter l'hypothèse null

- ANNEX B -

- TABLEAU B.1 : Les résultats des paramètres physiques de la zone I

sondage	profondeur	ω %	ω_L %	IP %	γ_s (KN/m ³)	γ_h (KN/m ³)	γ_d (KN/m ³)	SR %	<2 μ m
S37	6,00 - 6,50	19	53	29	-	22,53	18,96	-	-
S37	9,00 - 9,60	16	57	32	-	21,67	18,76	-	-
S37	15,20 - 15,65	15	70	41	-	21,67	18,76	-	-
sc 73	10,72 - 11	20,12	51	24	25,9	20,7	17,2	105	82
SC73	14,2 - 14,6	21,75	61	31,8	26,2	20,7	17	107	52
SC74	7,7 - 8,2	14,73	44	20,45	25,7	21,5	18,7	104	55
SC74	13,72 - 14,20	20,4	65	33,37	25,5	20,8	17,3	111	46
SC 74	21,38 - 21,78	21,61	60,2	31,12	25,6	20,6	16,9	110	-
SC 75	3,4 - 4	20,74	50,8	27,85	25,1	21	17,4	110	60
SC75	13,64 - 14,14	13,75	52,4	26	24,4	21,1	18,5	109	42
SC 75	18,07 - 18,49	11,78	35,4	14	25,3	22,2	19,8	110	49
SC 76	8,2 - 8,45	19,94	37,5	14,19	25,1	20,4	17	107	54
SC76	16,95 - 17,45	22,94	54	27,6	24,8	19	15,5	97	41
SC76	26,1 - 26,6	28,05	63,5	32,3	24,9	19,1	14,9	106	80
Sc77	15,00 - 15,50	23,61	52,2	26,7	25,1	19,9	16,1	108	60
Sc77	16,5 - 16,93	23,07	49,6	22	25,9	20,1	16,4	105	46
Sc78	7,00 - 7,50	27,07	46	25	25,1	19,7	15,5	111.829	31
Sc78	12,50 - 13,00	22,3	36	20	25,3	20,4	16,6	109.73	41
SC79	8,00 - 8,37	27,22	37	21	26,2	19,9	15,6	106.98	29
SC79	12,45 - 12,85	30,04	41	21	25,4	19,7	15,1	114.02	48
SC79	26,00 - 26,30	22,69	46	27	26,1	20,8	17	112.77	35
SC79	26,60 - 26,93	24,73	44	23	25,9	20,5	16,5	114.66	38
Sc79	30,95 - 31,25	15,75	35	23	26,6	20,5	17,7	84	37

- TABLEAU B.2 : Les résultats des paramètres Mécanique la zone I

sondage	profondeur	Pc (bar)	C c (%)	C g (%)	C' (kPa)	Ø' (°)	qu (kPa)	Cu (kPa)
S37	6,00 - 6,50	-	-	-	-	-	161	80,5
S37	9,00 - 9,60	-	-	-	-	-	182	91
S37	15,20 - 15,65	-	-	-	-	-	1244	622
sc 73	10,72 - 11	-	-	-	-	-	360	82
SC73	14,2 - 14,6	13	0.17	0.063	-	-	-	-
SC74	7,7 - 8,2	-	-	-	-	-	-	-
SC74	13,72 - 14,20	15	0.15	0.062	-	-	575	287,5
SC 74	21,38 - 21,78	-	-	-	-	-	-	-
SC 75	3,4 - 4	-	-	-	-	-	-	-
SC75	13,64 - 14,14	11	0.12	0.04	-	-	-	-
SC 75	18,07 - 18,49	-	-	-	-	-	-	-
SC 76	8,2 - 8,45	-	-	-	-	-	-	-
SC76	16,95 - 17,45	2,5	0.18	0.023	-	-	-	-
SC76	26,1 - 26,6	-	-	-	-	-	-	-
Sc77	15,00 - 15,50	-	-	-	-	-	383,19	191,595
Sc77	16,5 - 16,93	-	-	-	12	28	-	-
Sc78	7,00 - 7,50	-	-	-	-	-	124,23	62,115
Sc78	12,50 - 13,00	-	-	-	-	-	143,85	71,925
SC79	8,00 - 8,37	-	-	-	-	-	-	-
SC79	12,45 - 12,85	-	-	-	-	-	-	-
SC79	26,00 - 26,30	-	-	-	-	-	-	-
SC79	26,60 - 26,93	-	-	-	-	-	-	-
Sc79	30,95 - 31,25	-	-	-	-	-	521,91	260,955

TABLEAU B.3 : Les résultats des paramètres physiques de la zone II

sondage	profondeur	ω %	ω_L %	IP %	γ_s (KN/m ³)	γ_h (KN/m ³)	γ_d (KN/m ³)	SR %	<2 μm
S43	4,6-4,9	15	56	38	--	19,48	16,96	99	51
S43	20,10/20,40	18	45	28	-	19,81	16,77	74	47
S45	8,50 - 9,00	14	42	23	-	22,18	19,48	-	-
S45	13,00 - 13,50	14	42	25	-	21,66	18,94	95	-
S45	16,10 - 16,40	14	52	32	-	21,64	18,94	95	-
SC 80	20,53 - 21,00	20	57	30	26,4	20,9	17,4	98	43
SC 80	26,00 - 26,50	22	58	32	26,1	21	17,3	100	44
Sc81	12,95 - 13,35	23	54	28	26,5	20,5	16,6	100	40
Sc81	22,00 - 22,50	23	55	30	26,5	20,5	16,7	99	41
SC81	28,00 - 28,50	30	56	28	26,2	19	14,6	95	45
SC 81	30,70 - 31,20	16	38	20	26,4	22,3	19,3	100	40
SC82	6,38-6,85	16	43	21	25,6	21,78	18,74	100	54
SC82	16,8-17,5	20	58	31	25,5	20,5	17,07	97	44
SC 82	21,45_21,95	15	59	29	25,4	20,7	17,95	86	45
SC82	24,8_25,2	21	58	29	25,8	20,21	16,78	95	39
SC 82	29,40_29,90	33	57	29	25,5	18,25	13,64	96	47
SC 82	43,95_44,45	25	58	29	26,1	19,42	15,5	96	47
Sc83	28,10-28,60	19,37	44	18	25,48	21,4	17,9	118.80	48
Sc84	16,00 - 16,40	22,57	49	23	26,8	20,6	16,8	103.58	47
Sc84	23,33 - 23,92	16,73	46	21	26,6	21,7	18,6	105.47	41

- TABLEAU B.4 : Les résultats des paramètres Mécanique la zone II

sondage	profondeur	Pc (bar)	C c (%)	C g (%)	C' (kPa)	Ø' (°)	qu (kPa)	cu(kPa)
S43	4,6-4,9	-	-	-	-	-	121	60,5
S43	20,10/20,40	-	-	-	-	-	442	221
S45	8,50 - 9,00	-	-	-	-	-	218	109
S45	13,00 - 13,50	-	-	-	-	-	281	140,5
S45	16,10 - 16,40	-	-	-	-	-	434	217
SC 80	20,53 - 21,00	-	-	-	-	-	-	-
SC 80	26,00 - 26,50	1,28	0.1382	0.0572	-	-	340	170
Sc81	12,95 - 13,35	-	-	-	-	-	266	133
Sc81	22,00 - 22,50	-	-	-	51	15	449	224,5
SC81	28,00 - 28,50	0,92	0.157	0.0372	-	-	407	203,5
SC 81	30,70 - 31,20	-	-	-	-	-	-	-
SC82	6,38-6,85	-	-	-	-	-	449	224,5
SC82	16,8-17,5	-	-	-	-	-	304	152
SC 82	21,45_21,95	3,48	0.1364	0.065	-	-	-	-
SC82	24,8_25,2	1,73	0.1832	0.503	41	18	-	-
SC 82	29,40_29,90	-	-	-	45	16	-	-
SC 82	43,95_44,45	-	-	-	-	-	-	-
Sc83	28,10-28,60	-	-	-	-	-	405,2	202,6
Sc84	16,00 - 16,40	-	-	-	-	-	240,6	120,3
Sc84	23,33 - 23,92	-	-	-	-	-	770,8	385,4

TABLEAU B.5 : Les résultats des paramètres physiques de la zone III

sondage	profondeur	ω %	ω_L %	IP %	γ_s (KN/m ³)	γ_h (KN/m ³)	γ_d (KN/m ³)	SR %	<2 μ m
S46	3,70 - 4,00	14	43	19	-	21,2	18,6	94	-
S46	6,70 - 7,00	16	48	22	-	22	19	100	-
S46	32,10 - 32,60	15	52	25	-	21,4	18,6	99	-
S47	7,00 - 7,30	17	51	28	-	22,92	19,56	100	-
S47	11,00 - 11,30	17	54	33	-	22,42	19,2	100	-
S47	18,40 - 19,00	18	53	24	-	22,64	19,6	100	-
SC 85	13,00-13,45	20	49	25	26,1	20,3	17	90	35
SC 85	16,25-16,50	19	52	26	26,1	20,7	17,3	94	32
SC 85	26,79-27,25	12	48	24	26,2	21,9	19,5	86	29
SC 86	6,60 - 7,00	17	45	23	26,1	21,4	18,3	96	31
SC 86	15,05 - 15,25	20	41	21	25,8	20,8	17,3	97	31
SC 86	28,00 - 28,50	18	42	21	26,5	21,2	17,9	97	33
SC 86	33,70 - 34,50	20	58	29	26,4	20,9	17,4	99	52
SC 87	13,30 - 13,80	-	53	26	-	20,5	16,8	100	42
SC 87	14,00 - 14,50	-	55	28	26,2	20,7	17,4	99	45
SC 87	19,00 -19,50	-	58	29	25,9	20	16	100	53
SC 87	27,50 - 28,00	-	42	21	26,7	20,4	17,1	95	33
SC 87	32,70 - 33,00	-	41	21	26,5	19,7	17	79	32
SC 88	6,00 - 6,45	26	56	28	-	19,3	18,6	97	45
SC88	16,60 - 16,95	16	56	28	26	20,3	17,5	100	45
SC 88	20,00 - 20,44	14,92	61	34	26,3	22	19,1	106.11	64
SC 88	28,17 - 28,80	18	57	28	26,8	20,8	17,7	95	42
SC 89	4,67 -5,05	12	56	28	26,2	19,2	17,3	62	44
SC 89	12,00 - 12,42	19	55	28	25,7	20,5	17,2	95	41
SC 89	22,90 -23,40	21	58	29	26	20,4	17	98	46

- TABLEAU B.6 : Les résultats des paramètres Mécanique la zone III

sondage	profondeur	Pc (bar)	C c (%)	C g (%)	C' (kPa)	Ø' (°)	qu (kPa)	Cu (kPa)
S46	3,70 - 4,00	-	-	-	-	-	680	340
S46	6,70 - 7,00	-	-	-	-	-	-	-
S46	32,10 - 32,60	-	-	-	-	-	1032	516
S47	7,00 - 7,30	-	-	-	-	-	212	106
S47	11,00 - 11,30	-	-	-	-	-	207	106,5
S47	18,40 - 19,00	-	-	-	-	-	296	148
SC 85	13,00-13,45	-	-	-	-	-	574	287
SC 85	16,25-16,50	-	-	-	53	15,58	-	-
SC 85	26,79-27,25	-	-	-	-	-	660	330
SC 86	6,60 - 7,00	1,84	0.1665	0.053	-	-	-	-
SC 86	15,05 - 15,25	-	-	-	-	-	444	222
SC 86	28,00 - 28,50	-	-	-	-	-	370	185
SC 86	33,70 - 34,50	-	-	-	-	-	364	182
SC 87	13,30 - 13,80	-	-	-	-	-	-	-
SC 87	14,00 - 14,50	-	-	-	-	-	-	-
SC 87	19,00 -19,50	-	-	-	-	-	-	-
SC 87	27,50 - 28,00	-	-	-	-	-	390	195
SC 87	32,70 - 33,00	1,72	0.139	0.0333	-	-	470	235
SC 88	6,00 - 6,45	-	-	-	-	-	-	-
SC88	16,60 - 16,95	3,6	0.1464	0.0503	-	-	211	105,5
SC 88	20,00 - 20,44	19	0.105	0,18	-	-	-	-
SC 88	28,17 - 28,80	-	-	-	-	-	246	123
SC 89	4,67 -5,05	-	-	-	-	-	-	-
SC 89	12,00 - 12,42	1,74	0.1332	0.0361	-	-	706	353
SC 89	22,90 -23,40	1,87	0.1399	0.0475	-	-	466	233

- TABLEAU B.7 : Les résultats des paramètres physiques la zone IV

sondage	profondeur	ω %	ω_L %	IP %	γ_s (KN/m ³)	γ_h (KN/m ³)	γ_d (KN/m ³)	SR %	<2 μ m
Sc93	13,10 - 13,50	13	41	20	26,2	20,3	18	68	45
Sc93	22,15 - 22,50	23	56	28	26,1	20,5	16,7	99	42
Sc94	19,00 - 19,50	25	59	30	26	19,6	15,7	93	35
Sc95	15,98 - 16,50	24	43	18	25	20	16,1	100	33
SC 95	18,77 - 19,50	23	43	17	26	20,3	16,5	100	42
Sc95	24,50 - 25,00	31	47	20	26	18,1	13,8	93	49
Sc97	12,65 - 13,16	23,89	52	26	26,1	20,81	16,8	100	50
Sc97	15,88 - 16,50	26	55,6	25,23	26,6	20,3	16,2	100	45
Sc97	18,80 - 19,50	21	46,8	20,17	27	20,9	17,2	100	50
SC 97	23,00 - 23,34	20	36.3	14.6	26	21,9	18,3	100	38
SC 98	17,50 - 17,85	23	53	25	25,6	20,4	16,5	100	46
SC 98	20,73 - 21,00	12	35	19	25,7	22,1	19,7	100	32
SC 98	27,64 - 28,08	17	48	24	26,4	21,3	18,1	99	70

- TABLEAU B.8 : Les résultats des paramètres Mécanique de la zone IV

sondage	profondeur	Pc (bar)	C c (%)	C g (%)	C' (kPa)	ϕ' (°)	qu (kPa)	cu(kPa)
Sc93	13,10 - 13,50	-	-	-	-	-	428	214
Sc93	22,15 - 22,50	-	-	-	-	-	403	201,5
Sc94	19,00 - 19,50	-	-	-	-	-	537	268,5
Sc95	15,98 - 16,50	-	-	-	-	-	166,65	83,325
SC 95	18,77 - 19,50	-	-	-	-	-	-	-
Sc95	24,50 - 25,00	-	-	-	-	-	64,04	32,02
Sc97	12,65 - 13,16	-	-	-	-	-	432,07	216,035
Sc97	15,88 - 16,50	-	-	-	12	18	-	-
Sc97	18,80 - 19,50	-	-	-	-	-	446,56	223,28
SC 97	23,00 - 23,34	-	-	-	-	-	-	-
SC 98	17,50 - 17,85	-	-	-	-	-	-	-
SC 98	20,73 - 21,00	-	-	-	-	-	-	-
SC 98	27,64 - 28,08	-	-	-	-	-	-	-

- ANNEX C -

Tableau C.1 Base De Données Des paramètres géotechniques DE SOL Argileux Peu plasticité « AP »

sondage	profondeur	LCPC	ω %	ω_L %	IP %	γ_s (KN/m ³)	γ_h (KN/m ³)	γ_d (KN/m ³)	SR %	<2 μm
S46	3,70 - 4,00	AP	14	43	19		21,2	18,6	94	
SC82	6,38-6,85	AP	16	43	21	25,6	21,78	18,74	100	25
SC 86	6,60 - 7,00	AP	17	45	23	26,1	21,4	18,3	96	31
S46	6,70 - 7,00	AP	16	48	22		22	19	100	
Sc78	7,00 - 7,50	AP	27,07	46	25	25,1	19,7	15,5	111.829	31
SC74	7,7 - 8,2	AP	14,73	44	20,45	25,7	21,5	18,7	104	55
SC79	8,00 - 8,37	AP	27,22	37	21	26,2	19,9	15,6	106.98	29
SC 76	8,2 - 8,45	AP	19,94	37,5	14,19	25,1	20,4	17	107	54
S45	8,50 - 9,00	AP	14	42	23		22,18	19,48		
SC79	12,45 - 12,85	AP	30,04	41	21	25,4	19,7	15,1	114.02	24
Sc78	12,50 - 13,00	AP	22,3	36	20	25,3	20,4	16,6	109.73	18
SC 85	13,00-13,45	AP	20	49	25	26,1	20,3	17	90	35
S45	13,00 - 13,50	AP	14	42	25		21,66	18,94		
Sc93	13,10 - 13,50	AP	13	41	20	26,2	20,3	18	75	16
SC 86	15,05 - 15,25	AP	20	41	21	25,8	20,8	17,3	97	31
Sc95	15,98 - 16,50	AP	24	43	18	25	20	16,1	100	33
Sc84	16,00 - 16,40	AP	22,57	49	23	26,8	20,6	16,8	103.58	47
Sc77	16,5-16,93	AP	23,07	49,6	22	25,9	20,1	16,4	105	46
SC 75	18,07 -18,49	AP	11,78	35,4	14	25,3	22,2	19,8	110	49
SC 95	18,77 - 19,50	AP	23	43	17	26	20,3	16,5	100	42
Sc97	18,80 - 19,50	AP	21	46,8	20,17	27	20,9	17,2	100	50
S43	20,10-20,40	AP	18	45	28		19,81	16,77	74	47
SC 98	20,73 - 21,00	AP	12	35	19	25,7	22,1	19,7	100	32
SC 97	23,00 - 23,34	AP	20	36,3	14,6	26	21,9	18,3	100	38
Sc84	23,33 - 23,92	AP	16,73	46	21	26,6	21,7	18,6	105.47	41
Sc95	24,50 - 25,00	AP	31	47	20	26	18,1	13,8	96	49
SC79	26,00 - 26,30	AP	22,69	46	27	26,1	20,8	17	114.66	35
SC79	26,60 - 26,93	AP	24,73	44	23	25,9	20,5	16,5	112.77	38
SC 85	26,79-27,25	AP	12	48	24	26,2	21,9	19,5	86	29
SC 87	27,50 - 28,00	AP		42	21	26,7	20,4	17,1	95	33
SC 98	27,64 - 28,08	AP	17	48	24	26,4	21,3	18,1	99	70
SC 86	28,00 - 28,50	AP	18	42	21	26,5	21,2	17,9	97	33
Sc83	28,10-28,60	AP	19,37	44	18	25,48	21,4	17,9	118.80	48
SC 88	28,17 - 28,80	AP	18	57	28	26,8	20,8	17,7	95	42
SC 81	30,70 - 31,20	AP	16	38	20	26,4	22,3	19,3	100	18
Sc79	30,95 - 31,25	AP	15,75	35	23	26,6	20,5	17,7	84	13
SC 87	32,70 - 33,00	AP		41	21	26,5	19,7	17	79	32

Tableau C.1 (suite) la Base De Données Des paramètres géotechniques De SOL Argileux Peu plasticité « AP »

sondage	profondeur	LCPC	Pc (bar)	C t (%)	C g (%)	C' (kPa)	Ø' (°)	qu (kPa)	cu(kPa)
S46	3,70 - 4,00	AP						680	340
SC82	6,38-6,85	AP						449	224,5
SC 86	6,60 - 7,00	AP	1,84	0.166	0.053				
S46	6,70 - 7,00	AP							
Sc78	7,00 - 7,50	AP						124,23	62,11
SC74	7,7 - 8,2	AP							
SC79	8,00 - 8,37	AP							
SC 76	8,2 -8,45	AP							
S45	8,50 - 9,00	AP						218	109
SC79	12,45 - 12,85	AP							
Sc78	12,50 - 13,00	AP						143,85	71,925
SC 85	13,00-13,45	AP						574	287
S45	13,00 - 13,50	AP						281	140,5
Sc93	13,10 - 13,50	AP						428	214
SC 86	15,05 - 15,25	AP						444	222
Sc95	15,98 - 16,50	AP						166,65	83,325
Sc84	16,00 - 16,40	AP						240,6	120,3
Sc77	16,5-16,93	AP				12	28		
SC 75	18,07 -18,49	AP							
SC 95	18,77 - 19,50	AP							
Sc97	18,80 - 19,50	AP						446,56	223,28
S43	20,10/20,40	AP						442	221
SC 98	20,73 - 21,00	AP							
SC 97	23,00 - 23,34	AP							
Sc84	23,33 - 23,92	AP						770,8	385,4
Sc95	24,50 - 25,00	AP						64,04	32,02
SC79	26,00 - 26,30	AP							
SC79	26,60 - 26,93	AP							
SC 85	26,79-27,25	AP						660	330
SC 87	27,50 - 28,00	AP						390	195
SC 98	27,64 - 28,08	AP							
SC 86	28,00 - 28,50	AP						370	185
Sc83	28,10-28,60	AP						405,2	202,6
SC 88	28,17 - 28,80	AP						246	123
SC 81	30,70 - 31,20	AP							
Sc79	30,95 - 31,25	AP						521,91	260,95
SC 87	32,70 - 33,00	AP	1,72	0.139	0.033			470	235

Tableau C.2 Base De Données Des paramètres géotechniques DE SOL Argileux Tré plasticité « AT »

sondage	profondeur	LCPC	ω %	ω_L %	IP %	γ_s (KN/m3)	γ_h (KN/m3)	γ_d (KN/m3)	SR %	<2 μ m
SC 75	3,4 - 4	AT	20,74	50,8	27,85	25,1	21	17,4	110	60
S43	4,6-4,9	AT	15	56	38		19,48	16,96	99	51
SC 89	4,67 -5,05	AT	12	56	28	26,2	19,2	17,3	80	44
SC 88	6,00 - 6,45	AT	26	56	28		19,3	18,6	97	45
S37	6,00 - 6,50	AT	19	53	29		22,53	18,96		
S47	7,00 - 7,30	AT	17	51	28		22,92	19,56	101	
S37	9,00 - 9,60	AT	16	57	32		21,67	18,76		
sc 73	10,72 - 11	AT	20,12	51	24	25,9	20,7	17,2	105	82
S47	11,00 - 11,30	AT	17	54	33		22,42	19,2	101	
SC 89	12,00 - 12,42	AT	19	55	28	25,7	20,5	17,2	95	41
Sc97	12,65 - 13,16	AT	23,89	52	26	26,1	20,81	16,8	100	50
Sc81	12,95 - 13,35	AT	23	54	28	26,5	20,5	16,6	100	40
SC 87	13,30 - 13,80	AT		53	26		20,5	16,8	102	42
SC75	13,64 _14,14	AT	13,75	52,4	26	24,4	21,1	18,5	109	42
SC74	13,72 - 14,20	At	20,4	65	33,37	25,5	20,8	17,3	111	46
SC 87	14,00 - 14,50	AT		55	28	26,2	20,7	17,4	99	45
SC73	14,2 _14,6	AT	21,75	61	31,8	26,2	20,7	17	107	52
Sc77	15,00 - 15,50	AT	23,61	52,2	26,7	25,1	19,9	16,1	108	60
S37	15,20 - 15,65	AT	15	70	41		21,67	18,76		
Sc97	15,88 - 16,50	AT	26	55,6	25,23	26,6	20,3	16,2	100	45
S45	16,10 - 16,40	AT	14	52	32		21,64	18,94	95	
SC 85	16,25-16,50	AT	19	52	26	26,1	20,7	17,3	94	32
SC88	16,60 - 16,95	AT	16	56	28	26	20,3	17,5	100	45
SC82	16,8-17,5	AT	20	58	31	25,5	20,5	17,07	97	44
SC76	16,95 - 17,45	AT	22,94	54	27,6	24,8	19	15,5	97	41
SC 98	17,50 - 17,85	AT	23	53	25	25,6	20,4	16,5	100	46
S47	18,40 - 19,00	AT	18	53	24		22,64	19,6	100	
Sc94	19,00 - 19,50	AT	25	59	30	26	19,6	15,7	88	35
SC 88	20,00 - 20,44	AT	14,92	61	34	26,3	22	19,1	106.11	64
SC 80	20,53 - 21,00	AT	20	57	30	26,4	20,9	17,4	98	43

Tableau C.2 (suite) Base De Données Des Paramètres Physiques DE SOL Argileux
Tré plasticité « AT »

sondage	profondeur	LCPC	ω %	ω_L %	IP %	γ_s (KN/m ³)	γ_h (KN/m ³)	γ_d (KN/m ³)	SR %	<2 μm
SC 74	21,38 -21,78	AT	21,61	60,2	31,12	25,6	20,6	16,9	105	
SC 82	21,45_21,95	AT	15	59	29	25,4	20,7	17,95	86	45
Sc81	22,00 - 22,50	AT	23	55	30	26,5	20,5	16,7	99	41
Sc93	22,15 - 22,50	AT	23	56	28	26,1	20,5	16,7	99	42
SC 89	22,90 -23,40	AT	21	58	29	26	20,4	17	98	46
SC82	24,8_25,2	AT	21	58	29	25,8	20,21	16,78	95	39
SC 80	26,00 - 26,50	AT	22	58	32	26,1	21	17,3	100	44
SC76	26,1_26,6	AT	28,05	63,5	32,3	24,9	19,1	14,9	106	80
SC81	28,00 -28,50	AT	30	56	28	26,2	19	14,6	93	45
SC 82	29,40_29,90	AT	33	57	29	25,5	18,25	13,64	96	47
S46	32,10 - 32,60	AT	15	52	25		21,4	18,6	99	
SC 86	33,70 - 34,50	AT	20	58	29	26,4	20,9	17,4	99	52
SC 82	43,95_44,45	AT	25	58	29	26,1	19,42	15,5	96	47

Tableau C.2 (suite) la Base De Données Des Paramètres Mécaniques De SOL Argileux Très plasticité « At »

sondage	profondeur	LCPC	Pc (bar)	C t (%)	C g (%)	C' (kPa)	φ' (°)	qu (kPa)
SC 75	3,4 - 4	AT						
S43	4,6-4,9	AT						121
SC 89	4,67 - 5,05	AT						
SC 88	6,00 - 6,45	AT						
S37	6,00 - 6,50	AT						161
S47	7,00 - 7,30	AT						212
S37	9,00 - 9,60	AT						182
sc 73	10,72 - 11	AT						164
S47	11,00 - 11,30	AT						207
SC 89	12,00 - 12,42	AT	1,74	0.1332	0.0361			706
Sc97	12,65 - 13,16	AT						432,07
Sc81	12,95 - 13,35	AT						266
SC 87	13,30 - 13,80	AT						
SC75	13,64 _14,14	AT	11	0.12	0.04			
SC74	13,72 - 14,20	At	15	0.15	0.062			575
SC 87	14,00 - 14,50	AT						
SC73	14,2 _14,6	AT	13	0.17	0.063			
Sc77	15,00 - 15,50	AT						383,19
S37	15,20 - 15,65	AT						1244
Sc97	15,88 - 16,50	AT				12	18	
S45	16,10 - 16,40	AT						434
SC 85	16,25-16,50	AT				53	15,58	
SC88	16,60 - 16,95	AT	3,6	0.1464	0.503			211
SC82	16,8-17,5	AT						304
SC76	16,95 - 17,45	AT	2,5	0.18	0.023			
SC 98	17,50 - 17,85	AT						
S47	18,40 - 19,00	AT						403
Sc94	19,00 - 19,50	AT						537
SC 88	20,00 - 20,44	AT	19	0.105	0,18			
SC 80	20,53 - 21,00	AT						
SC 74	21,38 -21,78	AT						
SC 82	21,45_21,95	AT	3,48	0.1364	0.065			
Sc81	22,00 - 22,50	AT				51	15	449
Sc93	22,15 - 22,50	AT						403
SC 89	22,90 -23,40	AT	1,87	0.1399	0.0475			466
SC82	24,8_25,2	AT	1,73	0.1832	0.050	41	18	
SC 80	26,00 - 26,50	AT	1,28	0.1382	0.057			340
SC76	26,1_26,6	AT						
SC81	28,00 - 28,50	AT	0,92	0.157	0.037			407
SC 82	29,40_29,90	AT				45	16	
S46	32,10 - 32,60	AT						1032
SC 86	33,70 - 34,50	AT						364
SC 82	43,95_44,45	AT						

Tableau C.3 les tests statistiques des paramètres géotechniques d'un sol peu plastique (AP)

Les paramètres	Distribution	Goodness of Fit tests	Statistics	P-value	Decision at level(5%)
ω	Normal	K-S test	0,10824	0,82198	Can't reject Normal
		A-D test	0,40046	0,34387	Can't reject Normal
	Lognormal	K-S test	0,07279	1	Can't reject Lognormal
		A-D test	0,20259	0,86761	Can't reject Lognormal
	Weibull	A-D test	0,48353	0,22619	Can't reject Weibull
	Gamma	K-S test	0,07574	1	Can't reject Gamma
A-D test		0,24092	>0,25	Can't reject Gamma	
ω_L	Normal	K-S test	0,11229	0,7321	Can't reject Normal
		A-D test	0,41603	0,31633	Can't reject Normal
	Lognormal	K-S test	0,12826	0,545	Can't reject Lognormal
		A-D test	0,52183	0,17264	Can't reject Lognormal
	Weibull	A-D test	0,64027	0,08987	Can't reject Weibull
	Gamma	K-S test	0,1232	0,60085	Can't reject Gamma
A-D test		0,48216	0,23867	Can't reject Gamma	
IP	Normal	K-S test	0,13455	0,48012	Can't reject Normal
		A-D test	0,56089	0,13692	Can't reject Normal
	Lognormal	K-S test	0,16587	0,23357	Can't reject Lognormal
		A-D test	0,81536	0,03174	Reject Lognormal
	Weibull	A-D test	0,66559	0,07897	Can't reject Weibull
	Gamma	K-S test	0,15125	0,33307	Can't reject Gamma
A-D test		0,69249	0,07459	Can't reject Gamma	
γ_s	Normal	K-S test	0,0827	1	Can't reject Normal
		A-D test	0,2503	0,72242	Can't reject Normal
	Lognormal	K-S test	0,08674	1	Can't reject Lognormal
		A-D test	0,26487	0,67221	Can't reject Lognormal
	Weibull	A-D test	0,277	>0,25	Can't reject Weibull
	Gamma	K-S test	0,08546	1	Can't reject Gamma
A-D test		0,27886	>0,25	Can't reject Gamma	
γ_d	Normal	K-S test	0,0729	1	Can't reject Normal
		A-D test	0,25713	0,70216	Can't reject Normal
	Lognormal	K-S test	0,07491	1	Can't reject Lognormal
		A-D test	0,33106	0,50331	Can't reject Lognormal
	Weibull	A-D test	0,31534	>=0,25	Can't reject Weibull
	Gamma	K-S test	0,07634	1	Can't reject Gamma
A-D test		0,30277	>=0,25	Can't reject Gamma	

Tableau .C.3(suite) les tests statistiques des paramètres géotechniques d'un sol peu plastique (AP)

Les paramètres	Distribution	Goodness of Fit tests	Statistics	P-value	Decision at level(5%)
γ_h	Normal	K-S test	0,08213	1	Can't reject Normal
		A-D test	0,43597	0,28291	Can't reject Normal
	Lognormal	K-S test	0,08129	1	Can't reject Lognormal
		A-D test	0,44992	0,26148	Can't reject Lognormal
	Weibull	A-D test	0,60411	0,11199	Can't reject Weibull
	Gamma	K-S test	0,08086	1	Can't reject Gamma
A-D test		0,45033	$\geq 0,25$	Can't reject Gamma	
Sr	Normal	K-S test	0,19295	0,12901	Can't reject Normal
		A-D test	0,98856	0,01154	Reject Normal
	Lognormal	K-S test	0,21216	0,07335	Can't reject Lognormal
		A-D test	1,36772	0,00128	Reject Lognormal
	Weibull	A-D test	0,4826	0,22708	Can't reject Weibull
	Gamma	K-S test	0,20619	0,08794	Can't reject Gamma
A-D test		1,22513	$< 0,005$	Reject Gamma	
les éléments < 2um	Normal	K-S test	0,11564	0,76862	Can't reject Normal
		A-D test	0,59975	0,1099	Can't reject Normal
	Lognormal	K-S test	0,12446	0,66437	Can't reject Lognormal
		A-D test	0,48583	0,21123	Can't reject Lognormal
	Gamma	K-S test	0,11311	0,79979	Can't reject Gamma
		A-D test	0,51944	0,20394	Can't reject Gamma
qu	Normal	K-S test	0,10445	1	Can't reject Normal
		A-D test	0,29417	0,56718	Can't reject Normal
	Lognormal	K-S test	0,20212	0,2899	Can't reject Lognormal
		A-D test	0,74473	0,04453	Reject Lognormal
	Weibull	A-D test	0,34218	$\geq 0,25$	Can't reject Weibull
	Gamma	K-S test	0,16281	0,5615	Can't reject Gamma
A-D test		0,49456	0,23028	Can't reject Gamma	

Tableau C.4 les tests statistiques des paramètres géotechniques d'un sol très plastique (AT)

Les paramètres	Distribution	Goodness of Fit tests	Statistics	P-value	Decision at level(5%)
ω	Normal	K-S test	0,078	1	Can't reject Normal
		A-D test	0,32976	0,50575	Can't reject Normal
	Lognormal	K-S test	0,11167	0,66946	Can't reject Lognormal
		A-D test	0,4008	0,34595	Can't reject Lognormal
	Weibull	A-D test	0,46218	0,24759	Can't reject Weibull
	Gamma	K-S test	0,09784	0,85694	Can't reject Gamma
A-D test		0,34438	$\geq 0,25$	Can't reject Gamma	
ω_L	Normal	K-S test	0,13334	0,39723	Can't reject Normal
		A-D test	0,86922	0,0236	Reject Normal
	Lognormal	K-S test	0,11821	0,55711	Can't reject Lognormal
		A-D test	0,6686	0,07533	Can't reject Lognormal
	Gamma	K-S test	0,12678	0,46228	Can't reject Gamma
		A-D test	0,72153	0,06259	Can't reject Gamma
IP	Normal	K-S test	0,17551	0,12515	Can't reject Normal
		A-D test	1,04591	0,0085	Reject Normal
	Lognormal	K-S test	0,15446	0,23167	Can't reject Lognormal
		A-D test	0,7186	0,0564	Can't reject Lognormal
	Gamma	K-S test	0,16001	0,19847	Can't reject Gamma
		A-D test	0,80042	0,04	Reject Gamma
les éléments < 2um	Lognormal	K-S test	0,22598	0,05238	Can't reject Lognormal
		A-D test	1,76422	1,29E-04	reject Lognormal

Tableau C.4 (suite) les tests statistiques des paramètres géotechniques d'un sol très plastique (AT)

Les paramètres	Distribution	Goodness of Fit tests	Statistics	P-value	Decision at level(5%)
γ_s	Normal	K-S test	0,18079	0,21854	Can't reject Normal
		A-D test	0,85371	0,02495	Reject Normal
	Lognormal	K-S test	0,18323	0,20604	Can't reject Lognormal
		A-D test	0,90004	0,01905	Reject Lognormal
	Weibull	A-D test	0,37699	$\geq 0,25$	Can't reject Weibull
	Gamma	K-S test	0,18321	0,20617	Can't reject Gamma
A-D test		0,8967	0,02281	Reject Gamma	
γ_h	Normal	K-S test	0,12482	0,483	Can't reject Normal
		A-D test	0,74415	0,04864	Reject Normal
	Lognormal	K-S test	0,13325	0,3981	Can't reject Lognormal
		A-D test	0,73568	0,05109	Can't reject Lognormal
	Gamma	K-S test	0,13059	0,42367	Can't reject Gamma
		A-D test	0,73572	0,05673	Can't reject Gamma
γ_d	Normal	K-S test	0,14853	0,27171	Can't reject Normal
		A-D test	0,73827	0,05033	Can't reject Normal
	Lognormal	K-S test	0,13486	0,38312	Can't reject Lognormal
		A-D test	0,79046	0,03721	Reject Lognormal
	Gama	K-S test	0,13859	0,35003	Can't reject Gamma
		A-D test	0,76302	0,04772	Reject Gamma
Sr	Normal	K-S test	0,16769	0,18818	Can't reject Normal
		A-D test	1,04718	0,00836	Reject Normal
	Lognormal	K-S test	0,15796	0,24443	Can't reject Lognormal
		A-D test	1,11216	0,00574	Reject Lognormal
	Gama	K-S test	0,15997	0,23188	Can't reject Gamma
		A-D test	1,0648	0,0088	Reject Gamma
qu	Normal	K-S test	0,21849	0,174	Can't reject Normal
		A-D test	1,3664	0,0011	Reject Normal
	Lognormal	K-S test	0,108	1	Can't reject Lognormal
		A-D test	0,3460	0,4528	Can't Reject Lognormal
	Weibull	A-D test	0,7071	0,0587	Can't reject Weibull
	Gamma	K-S test	0,139	0,717	Can't reject Gamma
A-D test		0,479	0,244	Can't Reject Gamma	

