

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة الجيلالي بونعامة خميس مليانة

Université de Djilali Bounaama Khemis Miliana

Faculté des sciences de la nature et de la vie et des sciences de la terre

Département : Sciences de la terre



Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme de Master Spécialité : Géotechnique

Analyse statistique multi variable des données géotechnique des argiles marneuses de la région d'Alger

Présenté par :

Hannachi Bouchra

&

Matoug Dalila

Membre de jury :

- Présidente
- Encadreur
- Examineur
- Examinatrice

M^{me} BELHADJ F/Z

M^{me} FILALI M

M^r ZERROUKI.T

M^{me} KELLOUCHE.Y

2018/2019

Remerciements

*Avant tout, nous remercions « **ALLAH** », le tout puissant, de nous avoir donné le courage, la patience et la chance*

D'étudier et de suivre le chemin de la science.

*Nous tenons particulièrement à remercier notre promotrice madame **M.FILALI** pour avoir accepté de diriger ce travail, pour ses encouragements, orientations et ses conseils précieux*

Nos remerciements vont également aux membres du jury qui ont accepté d'évaluer notre travail et de nous avoir honorés par leur présence.

*Nous remercions vivement, l'ingénieur **Saidai Abou Bakre** département géotechnique de laboratoire LNHC (oued smar) pour leurs aides disponibilité et monsieur **Touil sami** chef département Agronomie*

Nous remercions tous ceux qui ont contribué de près ou de Loin à la mise en œuvre de ce travail.

Nous aimerons bien de remercier tous les étudiants de nos promotion de géotechnique, hydrogéologie

Nous adressons nos sincères remerciements à toute la famille, les amis et tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la mise en œuvre de ce travail.

Dédicace de la part de Hannachi Bouchra

Je dédie ce modeste travail à ceux qui sont les plus chère

A ma mère, qui a œuvré pour ma réussite, de par son amour, son soutien, tous les sacrifices consentis et ses précieux conseils, reçois à travers ce travail aussi modeste soit-il, l'expression de mes sentiments et de mon éternelle gratitude

A mon père, qui être fier et trouver ici le résultat de longues années de sacrifices et privations pour m'aider à avancer

Dans la vie. Puisse dieu faire en sorte que ce travail porte son fruit, merci pour les valeurs nobles, l'éducation et le soutien permanent

Venu de toi

*A mes sœurs(**Nadjwa**)*

A mes frères

A mon marie Mohammed sidna qui est toujours près de moi pour

M'encourager

A Ma binette et ma chère amie DALILA pour sa foi durant toute La période de réalisation de ce projet

A mes amies Iman Chaima Linda Amale Nour Nabiha Farouk Ali Islam

Aux étudiants de la promotion 2019-2020 de

Géotechnique pour les bons moments qu'on a passés. Ensemble.

À tous ceux qui ont contribué de près ou de loin pour que ce Projet soit possible

Dédicace de la part de Matoug Dalila

Je dédie ce modeste travail à ceux qui sont les plus chère

A ma mère, qui a œuvré pour ma réussite, de par son amour, son soutien, tous les sacrifices consentis et ses précieux conseils, reçois à travers ce travail aussi modeste soit-il, l'expression de mes sentiments et de mon éternelle gratitude

A mon père, qui être fier et trouver ici le résultat de longues années de sacrifices et privations pour m'aider à avancer

Dans la vie. Puisse dieu faire en sorte que ce travail porte son fruit, merci pour les valeurs nobles, l'éducation et le soutien permanent venu de toi

A mes sœurs Malika Fatiha Amina Zahra

A mes frère Souhaib et Ishak

A Ma binette et ma chère amie BOUCHRA pour sa foi durant toute La période de réalisation de ce projet

A mes amies Nadjwa Iman Chaima Linda Amale Nour Nabiha Farouk Ali Islam

Aux étudiants de la promotion 2019-2020 de

Géotechnique pour les bons moments qu'on a passés. Ensemble.

À tous ceux qui ont contribué de près ou de loin pour que ce Projet soit possible

RESUME :

Le développement rapide de la ville d'Alger au cours des dernières années dans des zones à risque qui formées essentiellement du marnes souvent altérées en surface, nécessite une attention particulière quant aux propriétés géotechnique de ces formations.

Actuellement, nombre de techniques classiques d'analyse statistiques ont été étudiées dans le domaine de la mécanique des sols. Toutefois, l'analyse de données, quant à elle, a rarement été appliquée à des données géotechniques. L'objectif de cette étude est donc de rechercher l'usage qui peut être fait de ce type d'analyse en mécanique des sols.

Dans cette étude nous présentons les résultats d'analyse statistiques sur la teneur en eau $w\%$, le degré de saturation S_r , les limites d'Atterberg (W_l et I_P), le poids volumique γ_d , analyse granulométrique, la cohésion C , l'angle de frottement ϕ , contrainte de prés consolidation P_C , le coefficient de compressibilité C_t , Coefficient de gonflement C_g , la résistance dynamique R_d .

Déverses approches statistiques ont été adoptées, on observe que les déférents paramètres suivent une loi normal et présentent une faible dispersion.

L'analyse en composantes principales (ACP) a permis d'utiliser en évidence deux groupes de données, comparées au résultat des essais géotechniques.

Ces deux groupes de données correspondent probablement à une zone des marnes altérées en surface et une zone de marne saine en profondeur.

Mots-clés : Marne –Analyse statistique – Les limite d'Atterberg –ACP-,l'angle de frottement ϕ

ABSTRACT:

The rapid development of the city of Algiers in recent years in risk areas that are mainly marl often altered surface requires special attention to the geotechnical properties of these formations.

At present, many conventional statistical analysis techniques have been studied in the field of soil mechanics.

However, analysis of data, temporarily, has rarely been applied to geotechnical data. The objective of this study is to investigate the use, which may be made of this type of analysis in soil mechanics

In this study we present the statistical analysis results on the water content $w\%$, the degree of saturation S_r , the Atterberg limits (W_l and I_p), the density Y_d , particle size analysis, the cohesion C , the friction angle ϕ , consolidation stress PC , compressibility coefficient C_t , swelling coefficient C_g , dynamic resistance R_d .

Statistical approaches have been adopted, it is observed that the different parameters follow a normal law and have a low dispersion.

Principal Component Analysis (PCA) allowed two groups of data to be used prominently compared to the results of the geotechnical tests.

These two groups of data probably correspond to an area of marls altered on the surface and a zone of healthy marl at depth.

Keywords: Marl - Statistical analysis – Atterberg limit –PCA- the friction angle ϕ

ملخص:

إن التطور السريع لمدينة الجزائر العاصمة في السنوات الأخيرة في المناطق المعرضة للخطر والتي غالباً ما تكون سطحية غير متغيرة ، يتطلب عناية خاصة للخصائص الجيوتقنية لهذه التكوينات.

في هذه الدراسة نقدم نتائج التحليل الإحصائي على محتوى الماء بنسبة٪، ودرجة التشبع Sr، وحدود Atterberg (Ip و WI)، الكتلة الحجمية Y_d ، وتحليل حجم الجسيمات ، والتماسك C ، وزاوية الاحتكاك ϕ ، ودمج الإجهاد Pc ، معامل الانضغاط C_t ، معامل التورم C_g ، المقاومة الديناميكية R_d .

تم تبني مقاربات إحصائية، ويلاحظ أن المعلمات المؤجلة تتبع قانوناً عادياً ولديها تشتت منخفض.

يسمح تحليل المكون الرئيسي (PCA) باستخدام مجموعتين من البيانات بشكل بارز مقارنة بنتائج الاختبارات الجيوتقنية. من المحتمل أن تتوافق هاتان المجموعتان من البيانات على مساحة من الرخويات التي تم تغييرها على السطح ومنطقة من المرل الصحية في العمق.

الكلمات المفتاحية: المرل طين - التحليل الإحصائي – حدود Atterberg - ACP - زاوية الاحتكاك ϕ

SOMMAIRE

REMERCIEMENTS

RESUME

ABSTRACTE

ملخص

LISTE DES FIGURES

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES NOTATIONS

INTRODUCTION GENERALE

Chapitre 1 : Synthèse BIBLIOGRAPHIQUE

1-1/ Introduction	01
1-2/ Historique	01
1-3/ Utilisation des statistiques dans le domaine de la géotechnique.....	01
1-4/Méthodes d'analyse.....	02
1-4.1 Statistique descriptive.....	02
1-4.2 Lois de distribution statistique.....	04
1-4.3 Testes statistiques	08
1-5/Statistique déductive	10
1-6/Statistique pour caractère bi variée (régression et corrélation).....	10
1-7/Statistiques multi variables.....	13
1-8/Analyse de Régression Multiple.....	14
1-9/Analyse Factorielle.....	14
1-10/Analyse en composantes principales.....	14
1-11/Variation Spatiales	16
1-12/ Conclusion	17

Chapitre 2 : présentation du site et méthodologie

2-1/Situation géographique	23
2-2/ Géologie de la zone d'étude.....	24
2-3/Méthodologie.....	25
2-3.1 Collecte de données	26
2-3.2 Les paramètres géotechniques étudié	27
2-4/ Conclusion	33

Chapitre 3 Résultats et discussion de l'analyse statistique

3-1 Introduction	35
3-2 Présentation des données.....	35
3-3 Analyse statistique des données	36
3-3.1 Les paramètres physiques.....	37
3-3.2 Paramètre mécanique.....	45
3-4 récapitulatif de l'analyse statistique univariable.....	49
3-5 l'analyse statistique multi variable.....	52
3-6 Conclusion	55

Chapitre 4 Analyse de donnée pénétrométriques

4-1Introduction	56
4-2/ L'essai au pénétromètre dynamique.....	56
4 -3/Présentations des donnée collectés	56
4-4/Etude des sondages pénétrométriques en fonction de la profondeur.....	57

4-5/présentation graphique des sondages pénétrométriques en fonction de la profondeur.....	58
4-6/Conclusion.....	65
Conclusion générale	67
Références bibliographique	68

LISTE DES FIGURE

Fig.1-1 : Diagramme en bâtons.....	03
Fig.1-2 : Diagramme en secteur.....	03
Fig.1-3 : Histogramme.....	04
Fig.2-1 : Situation géographique de la région d'étude (Google Earth 2019).....	23
Fig.2-2 : Les grands ensembles géographiques de la région d'Alger ((Z. Derrich et C.Lounis, 2004).....	24
Fig.2-3 : la carte géologique de Chéraga wilaya d'Alger à échelle : 1/50 000.....	25
Fig.2-4 : localisation géographique des sondages (Google Earth 2019).....	26
Fig.2-5 : Courbe de la compressibilité à l'œdomètre.....	29
Fig.2-6 : Courbe de cisaillement effort-déformation.....	30
Fig. 3-1 : Distribution de la teneur en eau en fonction de la profondeur.....	37
Fig. 3-2 : Loi de distribution de $w\%$	37
Fig. 3-3 : Boite représentative de la teneur en eau statistiques.....	37
Fig. 3-4 : Distribution de degré de saturation en fonction de la profondeur.....	38
Fig. 3-5 : Loi de distribution de $S_r \%$	38
Fig. 3-6 : Boite représentative de degré de saturation $S_r\%$	38
Fig. 3-7: Distribution de la limite de liquidité $W_l\%$ en fonction de la profondeur	39
Fig3-8 : Loi de distribution de W_l	39
Fig3-9 : Boite représentative de limite de liquidité.....	39
Fig3-10 : Distribution de l'indice de plasticité IP	40
Fig3-11 : Loi de distribution de IP.....	40
Fig3-12 : Boite représentative de l'indice de plasticité IP	40
Fig3-13 : Distribution de Le poids volumique sec.....	41
Fig3-14 : Loi de distribution de γ_d	41
Fig3-15 : Boite représentative de poids volumique sec	41

Fig3-16 : Distribution de Granulométrie 0.08 mm en fonction de la profondeur.....	42
Fig3-17 : Loi de distribution de granulométrie 0.08 mm.....	42
Fig3-18 : Boite représentative de granulométrie 0.08 mm.....	42
Fig3-19 : Distribution de Sédimentométrie 2 μ m en fonction de la profondeur.....	43
Fig3-20 : Loi de distribution de Sédimentométrie 2 μ m.....	43
Fig3-21 : Boite représentative de Sédimentométrie 2 μ m.....	43
Fig3-22 : Distribution de la cohésion.....	44
Fig3-23 : Loi de distribution de la cohésion C	44
Fig3-24 : Boite représentative de la cohésion.....	44
Fig3-25 : Distribution de l'Angla de frottement.....	45
Fig3-26 : Loi de distribution de l'angle de frottement.....	45
Fig3-27 : Boite représentative de l'angle de frottement.....	45
Fig3-28 : Distribution de la Contrainte de prés Consolidation P_c en fonction de profondeur.....	46
Fig3-29 : Loi de distribution de la <i>Contrainte de prés Consolidation</i> P_c	46
Fig3-30 : Boite représentative de la Contrainte de prés Consolidation P_c	46
Fig3-31 : Distribution de Le coefficient de compressibilité C_t	47
Fig3-32 : Loi de distribution de Le coefficient de compressibilité C_t	47
Fig3-33 : Boite représentative de Le coefficient de compressibilité C_t	47
Fig3-34 : Distribution de Le coefficient de <i>gonflement</i> C_g	48
Fig3-35 : Loi de distribution de Le coefficient de <i>gonflement</i> C_g	48
Fig3-36 : Boite représentative de Le coefficient de <i>gonflement</i> C_g	48
Fig3-37 : Boite représentative global	51
Fig3-38 : Matrice de corrélation.....	53
Fig3-39 : Représentation des variables sur le cercle de corrélation.....	55
Fig.4-1 : variation de la résistance dynamique (rd) en fonction de la profondeur (z) pour d'Ouled Fayet ouest	57

Fig.4-2 : variation de la résistance dynamique (rd) en fonction de la profondeur (z) pour Roukhi	58
Fig.4- 3: variation de la résistance dynamique (Rd) en fonction de la profondeur (z) pour Semrouni.....	60
Fig.4-4 : variation de la résistance dynamique (Rd) en fonction de la profondeur (z) pour Ouled Fayet Est.....	60
Fig.4-5 : Graphique des résistent dynamique deux couche pour Ouled Fayet Est.....	61
Fig.4-6 : Graphique des résistent dynamique deux couche pour Ouled Faye ouest....	61
Fig.4-7 : Graphique des résistent dynamique deux couche pour Roukhi	62
Fig.4-8 : Graphique des résistent dynamique deux couche pour Semrouni.....	63

LISTE DES TABLEAUX

N°de Tab	Titre des tableaux	Pages
Tab.1-1 :	La variable statistique à plusieurs dimensions	13
Tab.2-1 :	Nombre totale des données collectées (limites d'Atterberg)	27
Tab.2-2 :	Nombre totale des données collectées (Analyse granulométrique)	28
Tab.2-3 :	Nombre totale des données collectées (sédimentométrie)	28
Tab.2-4 :	Nombre totale des données collectées (œnométrie)	29
Tab.2-5 :	Nombre totale des données collectées (cisaillement)	30
Tab.2-6 :	Nombre totale des données collectées (teneur en eau (W%))	31
Tab.2-7 :	Nombre totale des données collectées.	31
Tab.2-8:	représentation générale des propriétés physiques , mécaniques , chimiques et les essais in situ dans chaque site d'étude	32
Tab. 3-1:	Données géotechniques analysées.	35
Tab. 3-2:	Statistiques descriptives de la teneur en eau w%.	36
Tab. 3-3 :	Statistiques descriptives du degré de saturation	38
Tab.3-4 :	Statistiques descriptives de la limite e liquidité	39
Tab .3-5 :	Statistiques descriptives de l'indice de plasticité	40
Tab.3-6 :	Statistiques descriptives de le poids volumique sec	41

Tab3-7 :	Statistiques descriptives de granulométrie 0.08 mm	42
Tab.3-8 :	Statistiques descriptives de Sédimentométrie 2 μ m	43
Tab.3-9 :	: Statistiques descriptives de la Cohésion	45
Tab.3.-10:	Statistiques descriptives de l'Angle de frottement $\varphi(^{\circ})$.	45
Tab.3-11 :	Statistiques descriptives de la Contrainte de prés Consolidation Pc	46
Tab3-12:	Statistiques descriptives de la Le coefficient de compressibilité Ct	47
Tab3-13:	Statistiques descriptives de la Le Coefficient de gonflement Cg	48
Tab.3-14 :	Description statistique des parametres Géotechniques	50

LISTE DES NOTATIONS

symbole	Définition
W(%)	Teneur en eau pondérale
WL	Limite de liquidité
IP	L'indice de plasticité
C	Cohésion
Φ	L'angle de frottement
γ_d	Le poids volumique sec
Sr	Degré de saturation
Cg	Coefficient de gonflement
Pc	contrainte de prés consolidation
γ_h	le poids volumique humide
Pg	Gonflement libre
Ct=CC	Coefficient de compressibilité
ACP	l'analyse en composantes principales
AFC	l'analyse factorielle des correspondances
Rd= Rp	Résistance dynamique du sol
XL.Stat	Programme de statistique d'Excel
σ^2	Variance théorique
σ	Ecart-type (théorique)
LNHC	Laboratoire nationale d'habitat et construction

Introduction Générale

Introduction Générale

Les sols argileux peuvent être classés en argile très plastique (CH) ou faiblement plastique (CL). Le comportement des sols argileux est défini en fonction de leurs propriétés physiques telles que la limite plastique, limite liquide et indice de plasticité ainsi que les paramètres mécaniques.

L'ingénieur géotechnicien traite les données d'essais pour obtenir ces paramètres de caractérisation et de conception. En pratique, les informations ne sont jamais suffisantes en quantité, ni totalement précises et exactes. De plus, les sols argileux sont naturellement complexes et variables à toutes les échelles, de la microstructure à l'échelle régionale. Elles peuvent être classés en argile très plastique (CH) ou faiblement plastique (CL). Leur comportement est défini en fonction de leurs propriétés physiques telles que la limite plastique, limite liquide et indice de plasticité ainsi que les paramètres mécaniques, d'où l'ingénieur compétent doit prendre en compte ce manque d'uniformité et d'information lors du paramétrage et de la modélisation du sol. Le niveau explicite avec lequel cela se produit dépend de l'approche choisie. Dans les approches déterministes, la variabilité n'est pas abordée explicitement comme dans les approches fondées sur l'incertitude.

La variabilité est une manifestation observable d'hétérogénéité d'un ou de plusieurs paramètres physiques et / ou processus. L'incertitude concerne l'état des connaissances et de la stratégie du modélisateur et reflète la décision de reconnaître et d'aborder la variabilité observée de manière qualitative ou quantitative.

Une nouvelle approche de la mécanique des sols s'imposait pour tenter de résoudre les problèmes d'hétérogénéité des sols et de modélisation de leur comportement pour mieux les appréhender. Les méthodes statistiques et probabilistes sont donc venues compléter les méthodes déterministes classiques.

C'est dans ce contexte que s'inscrit notre projet de fin d'étude qui se veut comme une contribution à une analyse statistique multi- variable à l'aide de l'analyse par les composante principale dans le but de tirer le maximum d'information sur les corrélations qui puissent exister entre les paramètres géotechniques des marnes plaisanciennes qui constituent le substratum sur lequel la ville d'Alger est en train de s'étendre après avoir épuisé toutes les formations stables comme les assises rocheuses du massif primaire au centre et les bancs molassique à sa périphérie ouest. . Ces derniers sont constitués principalement par des formations argileuses et marneuses souvent altérées en surface suite à leur grande sensibilité à l'eau. Par conséquent, une plus grande attention est portée aux propriétés d'ingénierie géotechnique des marnes et argiles marneuses du Sahel d'Alger.

Dans cette étude les résultats de l'analyse statistique de différents paramètres physiques et mécaniques tels que les limites d'Atterberg. La cohésion, ...etc. les résultats des essais in situ au pénétromètre dynamique ont été également analysés statistiquement en vue de délimiter les zones à risque.

Afin d'atteindre notre objectif, notre travail de projet de fin d'études est structuré comme suite :

Chapitre 1 : Ce chapitre a été consacré à une synthèse bibliographique sur les méthodes statistiques et leur contribution dans les études géotechniques.

Chapitre 2 : la méthodologie de notre étude a été présentée dans ce chapitre avec localisation et présentation du site d'étude.

Chapitre 3 : les résultats de l'analyse statistiques ont été présentés dans cette partie avec discussion et interprétation.

Chapitre 4 : ce chapitre a été consacré à l'analyse par les composantes principales des résultats de l'essai pénétrométrique, suivie d'une représentation de la variabilité de la résistance de pointe en fonction de la profondeur.

Chapitre I

1-1/Introduction

L'analyse statistique consiste principalement à trouver ou révéler une structure dans les données. Une structure est définie par un croisement entre 2 variables (par exemple tableau, histogramme par catégories, ou nuage de points) ou par plusieurs variables.

1-2/ Historique

Les premières réflexions sur l'utilisation des statistiques et probabilités dans le domaine de la géotechnique datent des années 50-60.

En 1951 Thornburn et Larsen (21), ont effectué une étude sur les sols du comté de DeWitt, Illinois et ont montré l'efficacité et le gain économique pouvant en découler de l'utilisation d'informations et de statistiques pédologiques dans la planification, la conception et la construction d'installations de transport.

D'autres travaux importants ont été consacrés à l'investigation des propriétés du sol et leur variabilité en étudiant différentes relations entre paramètres dont l'objectif est de faciliter les études géotechniques pour le dimensionnement des ouvrages. On cite ceux de :

- Odell, Thornburn and KcKenzie qui a introduit différentes combinaisons entre les limites d'Atterberg, la fraction argileuse, le pourcentage de montmorillonite et la capacité d'échange cationique.
- Les travaux de H. Karst (1960), qui consistaient à mettre en place des procédures de dimensionnement basées principalement sur la détermination des paramètres d'identification des sols et des corrélations entre les propriétés physiques et mécaniques des sols.

Des analyses statistiques variées ont été entreprises par plusieurs auteurs (Amar et Jézéquel 1972 ; Amar et al. 1973 ; Pilot et al. 1970 ; Morse and Thornburn ; Deen and the Pennsylvania State University

Avec le développement des méthodes numériques, les analyses statistiques ont été de plus en plus utilisées y compris les géostatistiques. (Magnan et Bagheri, 1982 ; Bagheri et Magnan 1983 ; Haghgou. 1983)

Depuis le début des années 1990, les réflexions sur la possibilité pratique d'appliquer des méthodes de dimensionnement probabiliste des ouvrages ou même d'analyse statistique des données géotechniques d'un site ou d'un tracé ont conduit à plus de pessimisme sur l'utilité pratique de ce type de recherche et un retour vers l'analyse des relations entre les propriétés physiques et mécaniques des sols, notamment par des techniques d'analyse factorielle, a été

effectué, tout en poursuivant les réflexions sur les implications méthodologiques des études antérieures (Megnounif Iméne-2013)

1-3/ Utilisation des statistiques dans le domaine géotechnique :

Les paramètres géotechniques mesurés in situ et en laboratoire présentent une grande variabilité qui peut être à l'origine d'incertitudes sur les valeurs représentatives de ces derniers ainsi que, sur la représentativité des résultats finaux des calculs géotechniques. Dans le but de résoudre les problèmes posés par l'influence de la dispersion, les géotechniciens ont eu recours aux méthodes statistiques et probabilistes dont l'objectif est de :

- ✓ caractériser la variabilité naturelle des sols pour optimiser les calculs classiques des ouvrages et pour mieux définir les hypothèses de calculs.
- ✓ Optimiser la reconnaissance géotechnique d'un point de vue économique. cela peut être possible grâce aux corrélations entre paramètres

L'étude d'un sol passe par la collecte de données issues des essais de laboratoires ou in-situ. L'analyse statistique permet de traduire ces valeurs numériques en informations utiles pour la réalisation du projet investi. Les méthodes couramment utilisées sont : La statistique descriptive est la branche des statistiques qui regroupe les nombreuses techniques utilisées pour décrire un ensemble relativement important de données.

- Les méthodes statistiques descriptives qui permettent d'analyser un ensemble relativement important de données à partir de paramètres et de graphes.
- Les modèles statistiques qui permettent d'ajuster les résultats recueillis sur un échantillon et lui attribuer des lois de probabilité afin de faire des prévisions et des interpolations sur la population. Cette statistique est basée sur la recherche d'un échantillon qui représente les données géotechniques. C'est-à-dire, il représente le mieux possible la diversité de la population entière

1-4/Méthodes d'analyse

1-4.1 Statistique descriptive

Le but de la statistique descriptive est de structurer et de représenter l'information contenue dans les données en :

- **Population** : c'est l'ensemble des sujets observés.
- **Caractère** : c'est la propriété étudiée sur ces sujets.

La qualité de l'enquête sur des échantillons avec n valeurs uniques x_i dépend fortement de la fonction de distribution choisie. Dans le cas des propriétés du sol, une distribution normale montre souvent déjà une conformité adéquate.

Cette distribution a l'attribut favorable que chaque combinaison linéaire de valeurs distribuées normales est à nouveau normalement distribuée. Ainsi, si deux paramètres distribués normaux ou plus sont résumés dans une relation linéaire avec une résistance résultante, la résistance conserve toujours la distribution normale (ISGSR 2011 - Vogt, Schuppener, Straub & Bräu (eds) - © 2011 Bundesanstalt für Wasserbau ISBN C. Pohl)

La caractéristique étudiée est dite caractère ou variable statistique. On distingue les caractères qualitatifs et les caractères quantitatifs qui peuvent être discrets ou continus.

➤ **Caractère statistique qualitatif :**

Caractère qu'on ne peut pas associer à un ensemble numérique discret ou continu. On parle de caractère qualitatif quand ce caractère n'est pas chiffré (langue, préférence, secteur d'activité, couleur, sexe, etc....)

Diagrammes en bâton ou en secteur : représentation graphique des effectifs ou proportions de chaque classe ;

*diagramme en bâtons est une représentation graphique de données statistiques à l'aide de segments. Les valeurs du caractère étudié sont représentées sur l'axe horizontal, les effectifs sur l'axe vertical. À chaque valeur correspond un bâton.

Les hauteurs des bâtons sont proportionnelles aux effectifs représentés (figure.1-1)

*diagramme en secteur est un type de diagramme utilisé en statistiques. Il permet de représenter un petit nombre de valeurs par des angles proportionnels à ces valeurs (figure.1-2)

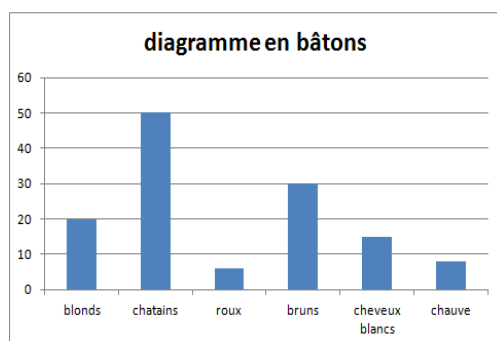


Fig.1-1 : Diagramme en bâtons

➤ **caractère statistique quantitatif :**

Caractère statistique continu qui peut prendre toutes les valeurs contenues dans un intervalle réel donné

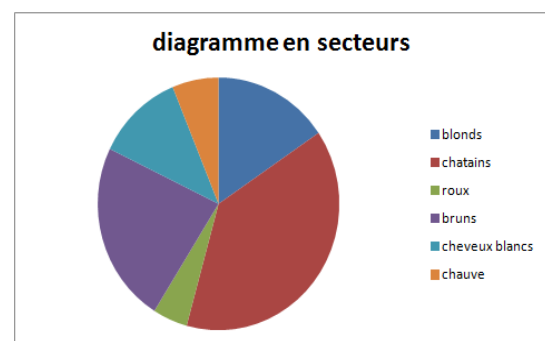


Fig.1-2 : Diagramme en secteur

- **Moyenne :**

Moyenne théorique $\mu = E[x]$

→ estimée par :

$$\bar{x} = \frac{X_1}{n}$$

(1)

Moyenne pas sensible à la variabilité → variance, écart-type

- **Variance et écart-type :**

Variance théorique

$$\sigma^2 = \text{var} [X] = E[x^2] - E[X]^2$$

(2)

→ estimée par

$$\frac{(x^1 - \bar{x})^2 + \dots + (x_n - \bar{x})^2}{n-1}$$

(3)

Ecart-type (théorique)

$$\sigma = \sqrt{\sigma^2}$$

(4)

- ❖ Visualisation graphique :

* **Histogramme** : est une représentation graphique permettant de représenter la répartition d'une variable continue en le représentant avec des colonnes verticales (figure.1-3)

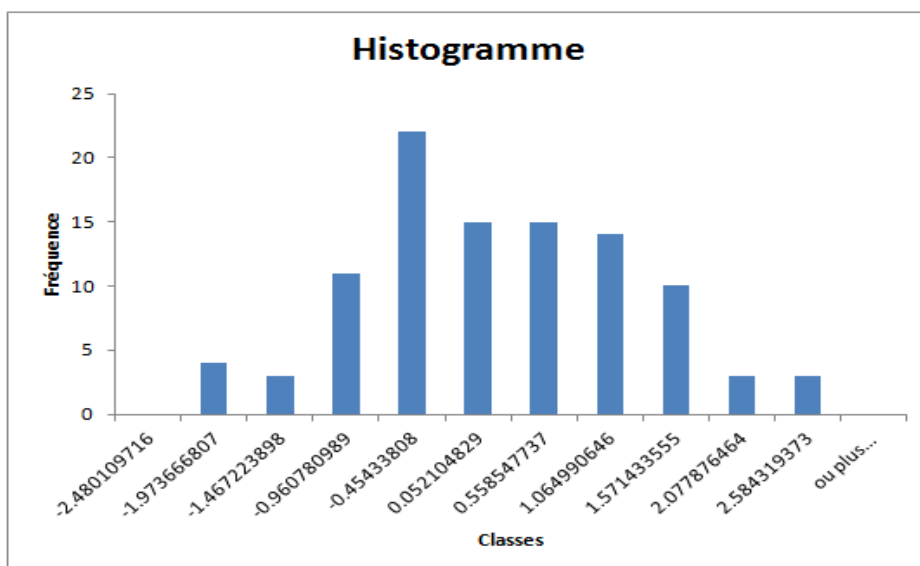


Fig.1-3 : Histogramme

-caractère statistique quantitatif discret qui peut prendre un nombre fini de valeurs dans un intervalle donné

1-4.2 Lois de distribution statistique

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

La fonction f doit être positive ou nulle et d'intégral égale à $(F(x) \geq 0)$

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

(5)

La probabilité de non dépassement est donnée par :

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

(6)

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

- *Loi uniforme
- *Loi de Bernoulli
- *Loi binomial
- *Loi binomial négative
- *Loi de poisson
- *Loi géométrique

Les caractères continus suivent les lois suivantes :

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

Les lois déduites de la loi normale sont :

- *Loi du χ^2 de Pearson
- *Loi de Student
- *Loi de Fisher-Snedecor

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

- **Loi normale**

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

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

(7)

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

Loi Log-Normale :

Une variable aléatoire X suit une loi log-normale quand son logarithme suit une loi normale. C'est à dire que : $Y = \ln X$ suit une loi Normale. La Fdp s'écrit :

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

(8)

α et β sont respectivement l'espérance et l'écart type de la variable $Y=\ln(x)$

Loi bêta :

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

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

$$a = m_x \left(\frac{m_x(1-m_x)}{v} - 1 \right)$$

(9)

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

(10)

$$f(x; a; \beta) = \begin{cases} \frac{x^{a-1}(1-x)^{\beta-1}}{\int_0^1 u^{a-1}(1-u)^{\beta-1} du} & x \in [0,1] \end{cases}$$

(11)

$$f(x; a; \beta) = \frac{\Gamma(a+\beta)}{\Gamma(a)\Gamma(\beta)} x^{a-1}(1-x)^{\beta-1} \mathbb{1}_{[0,1]}(x)$$

(12)

$$f(x; a; \beta) = \frac{1}{B(a,\beta)} x^{a-1} (1-x)^{\beta-1} \mathbb{1}_{[0,1]}(x)$$

(13)

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

(14)

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

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

Dans cette loi espérance mathématique :

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

(15)

Et la variance

$$v(x) = \frac{\alpha\beta}{(\alpha + \beta)^2(\alpha + \beta + 1)}$$

(16)

Rappelle sur les principales formules statistiques

-Moyenne :

$$\bar{x} = m_x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

(17)

- Variance :

$$v(x) = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - m_x)^2$$

(18)

- Ecart type :

$$\sigma = \sqrt{v(x)}$$

(19)

- Coefficient de variation :

$$cv(x) \text{ ou } cx = \frac{\sigma_x}{m_x}$$

(20)

- Coefficient d'asymétrie :

$$\sqrt{\beta_1} = \frac{\mu_3}{\sigma^3}$$

(21)

- Coefficient d'aplatissement :

$$\beta_2 = \frac{\mu_4}{\sigma^4}$$

(22)

$$\mu_3 = \frac{n}{(n-1)(n-2)} \sum_{i=1}^n (x_i - m_x)^3$$

(23)

$$\mu_3 = \frac{n}{(n-1)(n-2)(n-3)}$$

(24)

$$x \left\{ (n+1) \sum_{i=1}^n (x_i - m_x)^4 - 3 \frac{(n-1)}{n} \left[\sum_{i=1}^n (x_i - m_x)^2 \right]^2 \right\} \\ + 3 \left[\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - m_x)^2 \right]^4$$

(25)

μ^3 Est proche de zéro lorsque la distribution des valeurs du paramètre

1-4.3 Testes statistiques

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

Les tests statistiques sont faits pour assurer une comparaison entre les observations à partir d'une étude statistique et aux valeurs, auxquelles on peut s'attendre d'une hypothèse quelconque, Il existe plusieurs tests entre eux, les tests d'adéquation et comparaison de distributions, qu'on utilise dans ce chapitre.

-Test d'adéquation de Kolmogorov :

Propose de construire une statistique de test basée sur la distance entre la fonction de répartition F et une estimation de la fonction de répartition de la variable X qui est supposée suivre une loi quelconque obtenue à partir des observations, on pose les hypothèses de tests suivantes :

H_0 : X suit la loi F

H_1 : X suit une autre loi.

L'équation

$$fn(x) = \frac{\text{card}(1/x_i \leq x)}{n} \quad x \in R$$

(26)

Kolmogorov propose la statistique de test suivante

$$Dn = \sup |fn(x) - f(x)|$$

(27)

-Test d'adéquation du chi 2 : loi discrète

La loi de distribution se rapproche de la distribution du χ^2 à $(k-r-1)$ degrés de liberté, quand la loi théorique est valide (Monbet, 2009)

On utilise une statistique de test du chi 2 donnée par :

$$T = \sum_{k=1}^k \frac{(n_i - e_i)^2}{e_i} \quad (28)$$

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

n_i : Nombre d'observation qui tombent dans la i ème classe,

e_i : Nombre théorique des éléments de la classe i ;

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

On suppose que la loi de distribution théorique, est la même loi de distribution réelle de la population.

Le teste par rapport à χ^2 qui est une valeur particulière de T , ou α représente le niveau de signification qui se déroule de la façon suivante :

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

- Calculer les effectifs e_i des classes pour la loi testée

$$e_i = n \cdot [g(x) - g(x_i - 1)] \quad (29)$$

$G(x)$ est une fonction de répartition

- Calculer T_1 ,

- Chercher dans une table des valeurs de χ_{α}^2 correspondant au nombre de degré de liberté $(k-r)$, puis fixer une valeur du niveau de signification α qui est liée à χ_{α} , et dire si la loi testée est valide ($T_1 \leq \chi_{\alpha}$) (ABDUL BAKI et al., 1993).

-Test de Shapiro-Wilk:

Ce teste se fait que pour les variable qui suivent une loi normale, il est basé sur une comparaison de deux estimateurs liés a la variance, cette comparaison est faite par un rapport (Monbet, 2009).

La procédure tu teste est la suivante :

- Les observations s sont classées par ordre de grandeurs croissantes :

- Calculer la valeur de W qui est donné par :

$$W = \frac{(\sum_{i=1}^n a_i x(i))^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (30)$$

a (i) : constantes données par :

$$(a^1; \dots \dots \dots, a_n) = \frac{E^{TV-1}}{(E^{TV-1} V^{-1} E)^{1/2}} \quad (31)$$

- Tester la signification de W par la table de Shapiro-Wilk

-Teste de qualité de l'ajustement :

L'authenticité de la distribution choisie (théorique) avec la distribution réelle (empirique) doit être vérifiée. Premièrement, une comparaison visuelle de la distribution empirique et théorique est recommandée. Si les deux les distributions montrent un ajustement visuel satisfaisant, un test d'hypothèse devrait également vérifier la distribution théorique. Dans ce contexte, le test Kolmogorow-Smirnow selon Lilliefors est devenu populaire, car sa procédure très simple (Hartung et al. 1989).

L'hypothèse "Les différences existantes entre distribution empirique et théorique ne sont pas stochastiques justifiée "doit être écartée si l'écart maximal des deux distributions ne correspond pas dépasser une valeur critique

1-5/ Statistique déductive

La statistique déductive permet une estimation de la moyenne ou la valeur inférieure de la population sur la base des échantillons disponibles provenant d'une enquête de site par définition d'intervalle de confiance,

-La statistique déductive ou descriptive : elle a pour but de résumer et de présenter les données observées sous la forme la plus accessible (simplification et réduction des données, à la fois visuelle et conceptuelle).

-L'analyse inductive ou inférence statistique est l'ensemble des méthodes permettant de formuler en termes probabilistes un jugement sur une population, à partir des résultats observés sur un échantillon extrait au hasard de cette population. Les méthodes statistiques les plus classiques sont celles de l'estimation (estimation par domaine de confiance) et celles de l'épreuve d'hypothèse. Leurs conceptions de base sont dues essentiellement à R.A. FISHER

1-6/ Statistique pour caractère bi variée (régression et corrélation)

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

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

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

D'analyser la liaison et voir s'il existe une relation entre X et Y. l'analyse se fait en général par un nuage de n points définie par $[(x_i, y_i); 1 < i < n]$, cette analyse graphique permet de comprendre les différentes caractéristiques énumérées ci-dessous:

- ❖ Situer les proximités entre les individus,
- ❖ Etudier la forme globale des points,
- ❖ Voir, s'il existe une forme de liaison ou de régularité,
- ❖ Détecter visuellement les points qui s'écartent des autres.
- ❖ Définir la forme de la relation entre X et Y. La relation peut être Linéaire positive, linéaire négative comme on peut avoir des liaisons monotones non linéaire, liaisons non-linéaires et non-monotones ou absence de liaison.
- ❖ Quantifier l'intensité de la liaison.

- **Droite de corrélation :**

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

$$Y = aX + b.$$

(32)

- **Critère des W moindre carrés**

La droite est tracée en déterminant les coefficients a et b, de telle sorte que avec :

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

(33)

Le principe de la méthode des moindres carrés, est que la somme des carrés des distances e_i soit minimale. Les paramètres a et b du modèle doivent donc vérifiés le minimum de la fonction

$$\emptyset(a, b) = (\sum e_i)^2 = (y_i - (ax_i - b))^2$$

(34)

Le développement de cette équation peut être arrangé suivant l'équation suivante

$$\begin{aligned} \varphi(a, b) = & \left(\sum_{i=1, \dots, n} x_i^2 \right) a^2 + nb^2 + \left(2 \sum_{i=1, \dots, n} x_i \right) ab - \left(2 \sum_{i=1, \dots, n} x_i y_i \right) a - \left(2 \sum_{i=1, \dots, n} y_i \right) b \\ & + \left(\sum_{i=1, \dots, n} y_i^2 \right) \end{aligned} \quad (35)$$

$\varphi(a, b)$ est une fonction à deux variables. Le tracé de la fonction $\varphi(a, b)$ représente une concavité vers le haut. On déduit alors que le minimum est existé et il est unique. Donc le minimum est obtenu là où les dérivées premières s'annulent.)

On obtient :

$$\left\{ \frac{\partial \varphi}{\partial a}(a, b) = \frac{\partial}{\partial a} \left(\sum_{i=1, \dots, n} (y_i - ax_i - b)^2 \right) = 0 \right\} \quad (36)$$

$$\left\{ \frac{\partial \varphi}{\partial b}(a, b) = \frac{\partial}{\partial b} \left(\sum_{i=1, \dots, n} (y_i - ax_i - b)^2 \right) = 0 \right\} \quad (37)$$

On divise tous les termes du second membre du système par n, on obtient :

$$a \frac{1}{n} \sum_{i=1; n} x_i^2 + b \frac{1}{n} \sum_{i=1; n} x_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1; n} x_i y_i \quad (38)$$

$$a \frac{1}{n} \sum_{i=1; n} x_i + b = \frac{1}{n} \sum_{i=1; n} y_i \quad (39)$$

Le système peut être écrit par :

$$\begin{cases} a\bar{x}^2 + b\bar{x} = \bar{xy} \\ a\bar{x} + b = \bar{y} \end{cases} \quad (40)$$

En résolvant le système, on utilise le déterminant on obtient :

$$a = \frac{1}{v(x)} \begin{vmatrix} \bar{xy} & \bar{x} \\ \bar{y} & 1 \end{vmatrix} = \frac{\bar{xy} - \bar{x}\bar{y}}{v(x)} \quad (41)$$

Et

$$b = \bar{y} - \bar{x} \frac{\bar{xy} - \bar{x}\bar{y}}{v(x)} \quad (42)$$

- **Qualité de l'ajustement linéaire entre les caractères X et Y**

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

$$R = \frac{\sum_{i=1;n} (x_i - \bar{X})(y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1;n} (x_i - \bar{X})^2 \sum_{i=1;n} (y_i - \bar{Y})^2}} = \frac{cov(X,Y)}{\sigma_x \sigma_y} \quad (43)$$

- **Interprétation du coefficient de corrélation**

On considère le vecteur \bar{Y} représentant les valeurs observées du caractère Y et Y^* représentant les valeurs estimées par la droite de corrélation :

$$Y = \begin{pmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ \vdots \\ Y_n \end{pmatrix} \text{ et } y^* = \begin{pmatrix} ax_1 + b \\ ax_2 + b \\ \vdots \\ ax_n + b \end{pmatrix} \quad (44)$$

La corrélation est d'autant satisfaisante que l'angle Θ formé entre les deux vecteurs soit faible. Ce pendant une relation entre l'angle Θ et les vecteurs y et y^* est donnée par le produit scalaire

$$\langle Y; Y^* \rangle = \|Y\| \cdot \|Y^*\| \cdot \cos \theta \quad (45)$$

Après arrangement, on trouve :

$$\cos(\theta) = \frac{\langle Y; Y^* \rangle}{\|Y\| \cdot \|Y^*\|} = \frac{cov(X;y)}{\sigma_x \sigma_y} = R \quad (46)$$

1-7/Statistiques multi variables

Les analyses multi variées sont très diverses selon l'objectif recherché, la nature des variables et la mise en œuvre formelle. On peut identifier deux grandes familles :

- * les méthodes descriptives, visant à structurer et résumer l'information ;
- * les méthodes explicatives visant à expliquer une ou des variables dites « dépendantes » (variables à expliquer) par un ensemble de variables dites « indépendantes » (variables explicatives).

Les paramètres étudiés peuvent être mixtes. La variable statistique à plusieurs dimensions est une variable composée de nombreuses variables statistiques à une dimension, dont l'une est expliquée et les autres sont explicatives et qui se présente comme suite.

Tab.1-1 : La variable statistique à plusieurs dimensions

U	V	W	X	M
u1	v1	w1	x1			m1
u2	v2	w2				
.						.
.
.						.
UN	V N	W N	X N			M N

Différentes techniques d'analyse statistique multi-variables peuvent être utilisées pour caractériser les relations existantes à l'intérieur d'un ensemble de paramètres.

Les méthodes les plus utilisés dans le domaine de la géotechnique, sont l'analyse de régression multiple et l'analyse factorielle (J.P Magnan, 1982). Ce sont elles qui sont décrites dans ce qui suit.

1-8 Analyse de Régression Multiple

L'analyse par régression linéaire multiple permet d'observer les liens entre une variable quantitative dépendante Y et n variables quantitatives indépendante X_i (variables explicatives). Elle est aussi définie comme une analyse statistique qui décrit les variations d'une variable endogène associée aux variations de plusieurs variables exogènes.

1-9 Analyse Factorielle

Elle permet de décrire un ensemble de variables observées, au moyen de variables latentes (non observées). Pour réduire le nombre de variables, la méthode calcule ces variables latentes comme combinaisons linéaires des variables observées. Créée par **Charles Spearman (wikipédia)**. A partir des années soixante, L'analyse factorielle a été développée laissant la place à deux grandes familles de la statistiques qui sont l'Analyse en composantes principales (ACP) et l'analyse factorielle des correspondances (AFC).

1-10 Analyse en composantes principales

L'objectif de l'analyse en composantes principales (ou ACP) est purement descriptif : il s'agit d'explorer un ensemble d'observations rassemblées sous la forme d'un tableau de données indiquant pour chaque unité statistique les valeurs observées d'un certain nombre de variables quantitatives.

L'unité statistique peut être primaire (par exemple un individu, une entreprise) ou secondaire. Dans ce dernier cas, il s'agit de regroupement d'unités statistiques primaires.

Le tableau de données peut être de dimensions importantes : le nombre de lignes (d'unités statistiques) peut atteindre plusieurs centaines, et le nombre de colonnes (de variables) plusieurs dizaines. Le nombre d'observations, suivant son importance, pourra donner un caractère de généralité aux propriétés structurelles.

L'analyse en composantes principales est fondée sur le calcul des moyennes, variances et coefficients de corrélation. Les données doivent donc être **quantitatives** : elles peuvent être discrètes ou continues.

➤ Interprétation des résultats

1°) Déterminer le nombre d'axes de l'analyse.

Pour répondre à cette question, il faut consulter le tableau des valeurs propres qui accompagne l'ACP. Les valeurs propres sont classées de façon décroissante. L'inertie de chaque axe et l'inertie cumulée figurent également dans ce tableau

Il y a deux manières pour déterminer le nombre d'axes à prendre en compte :

-Un critère absolu : ne retenir que les axes dont les valeurs propres sont supérieures à 1 (c'est le critère de Kaiser).

- Un critère relatif : retenir les valeurs propres qui "dominent" les autres, en se référant au graphique en barres des valeurs propres.

2°) Sélectionner les individus et variables à interpréter

Les mappings de l'ACP sont les projections des variables et des individus sur un plan factoriel déterminé. On commencera par interpréter le premier plan factoriel (celui formé par les facteurs F1 et F2) car c'est celui qui concentre la plus grande partie de l'information du nuage. On ira voir ensuite le cas échéant des autres plans factoriels

Sur un plan factoriel, on n'interprète que les variables et les individus qui sont bien représentés. Pour les individus, on utilisera les contributions absolues et relatives alors que pour les variables, on n'interprètera que celles qui sont proches du cercle de corrélation.

3°) Les sorties des graphiques

Deux mappings sont donnés par les logiciels: celui des variables et celui des individus.

3.1°) La représentation des variables.

Ce mapping se distingue par la présence d'un cercle de corrélation. Sur un plan factoriel déterminé, on n'interprète que les variables qui sont bien représentées c'est-à-dire celles qui sont proches ou sur le cercle de corrélation. On interprète deux types de positions :

Les positions des variables par rapport aux axes afin de déterminer quelles sont les variables qui font les axes. On va ainsi pouvoir nommer les axes en fonction des variables.

Les positions des variables les unes par rapport aux autres. Le coefficient de corrélation entre deux variables étant le cosinus de l'angle formé par les vecteurs on en déduit que :

- Deux variables qui sont proches ou confondu (angle de 0°) sont corrélées positivement (coefficient de corrélation proche de 1),
- Deux variables opposées (formant un angle de 180°) sont corrélées négativement (coefficient de corrélation proche de -1)
- Deux variables positionnées à angle droit (angle de 90°) ne sont pas du tout corrélées (Coefficient de corrélation égal à 0)

3.2°) La représentation des individus

Deux cas se présentent :

L'ACP est réalisé sur un tableau comportant beaucoup d'individus (plus de 30). Dans ce cas, on ne pourra pas interpréter les positions relatives de tous les individus car le nuage sera tellement dense que l'on n'y verra pas grand-chose. Toutefois, si un individu est atypique, il va ressortir du nuage et on pourra alors l'identifier pour éventuellement le supprimer et effectuer un nouveau passage sans cet individu. Dans ce cas, on a souvent recours à une méthode classification automatique afin de regrouper les individus qui sont proches les uns des autres et ainsi de constituer des type d'individus ayant un comportement similaire.

Si l'ACP est réalisée sur un nombre d'individus plus faible, l'interprétation du nuage des individus est alors possible. C'est notamment le cas lorsque l'on travaille avec des unités statistiques secondaires, où il sera par exemple intéressant d'étudier la position de telle ou telle couche géologique.

Quel que soit le cas envisagé, on n'interprète, sur un plan factoriel déterminé, que les individus qui sont bien représentés. Pour cela, il faut aller voir leurs contributions absolues et relatives.

Sous réserve d'une bonne représentation, la proximité de deux individus sur un plan factoriel est synonyme d'individus ayant un comportement similaire, c'est-à-dire ayant des réponses aux variables de l'analyse qui sont très proches. Si deux individus ont exactement les mêmes valeurs aux différentes variables, ils seront superposés sur les différents plans factoriels. De même, des individus ou des groupes d'individus s'opposant par rapport à un axe factoriel, s'opposeront par rapport aux variables qui « font » cet axe.

3.3°) La représentation individus/variables

Bien qu'elle soit mathématiquement contestable, les logiciels standards fournissent une représentation graphique dans laquelle est juxtaposée la projection des variables et des individus. Cette représentation permet de visualiser les individus ayant des valeurs élevés (ou faible) de telle ou telle variable.

1-11/ Variations Spatiales

Lorsqu'on mesure une caractéristique en un point, on peut considérer la valeur obtenue comme la réalisation d'une variable aléatoire en ce point. Il en est de même pour tous les points d'un échantillon donné. On a une infinité de variables aléatoires représentant conjointement l'échantillon. Il y a deux étapes principales dans une étude lors de variation spatiale :

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

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

1-12/ CONCLUSION

L'analyse statistique est un outil puissant de synthèse de l'information, très utile lorsque l'on a un nombre important de données quantitatives à traiter et interpréter. L'apparition au cours des dernières années de logiciels chaque fois plus performants et faciles à utiliser rend aujourd'hui accessible ce type d'analyses des données dans différents domaines.

La méthode statistique donne offre un outil indispensable, permettant :

* d'établir des relations entre les paramètres physiques d'un sol et en tirer par la suite des formules pouvant être généralisée sur des sols qui peuvent avoir des propriétés identiques d'un point vue lithologique ou géotechnique.

* de caractériser la variabilité naturelle des propriétés du sol, ce qui permet d'augmenter l'efficacité de la reconnaissance géotechnique.

2-1/Situation géographique

La zone d'étude se situe au niveau de la wilaya d'Alger, à environ 19 km au sud-ouest. La commune d'Ouled Fayet s'étale sur une superficie de 18,21 km² et dont les coordonnées géographiques sont (36° 44' 10'' nord, 2°56' 58'' est) (figure 2-1)

Elle est limitée par :

- la commune de Chéraga et Dely Brahim au Nord
- la commune de Baba Hassen et Douera au Sud
- la commune de Rahmania et Soudania à l'Ouest
- la commune d'El-Achour à l'Est

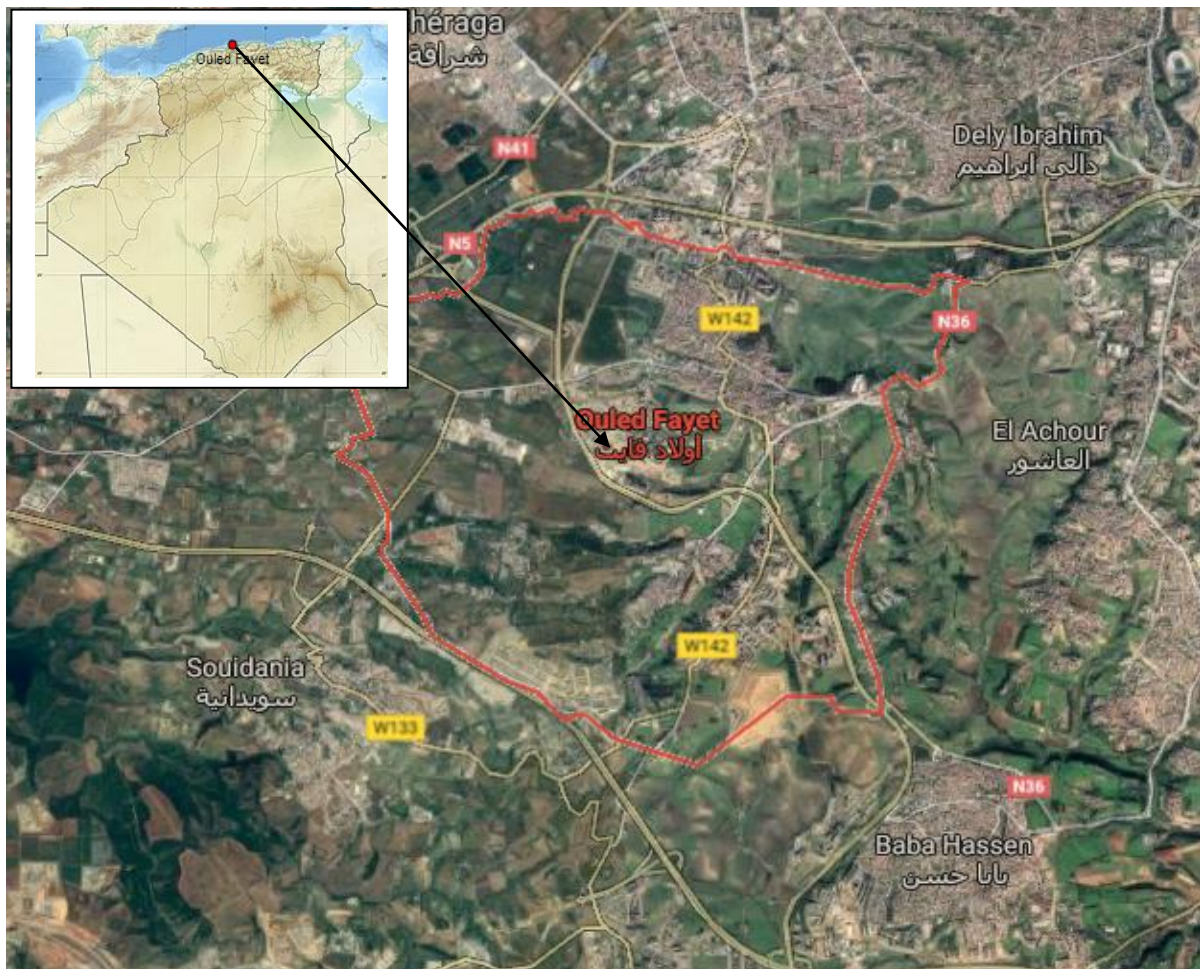


Fig.2-1: Situation géographique de la région d'étude (Google Earth 2019)

2-2/ Géologie de la zone d'étude

Le site de notre étude fait partie du Sahel d'Alger qui s'étend entre, au nord le massif d'Alger, au sud la rive gauche de l'oued El Harrach et au sud-est la rive droite de l'oued Mazafran (figure 2-2)

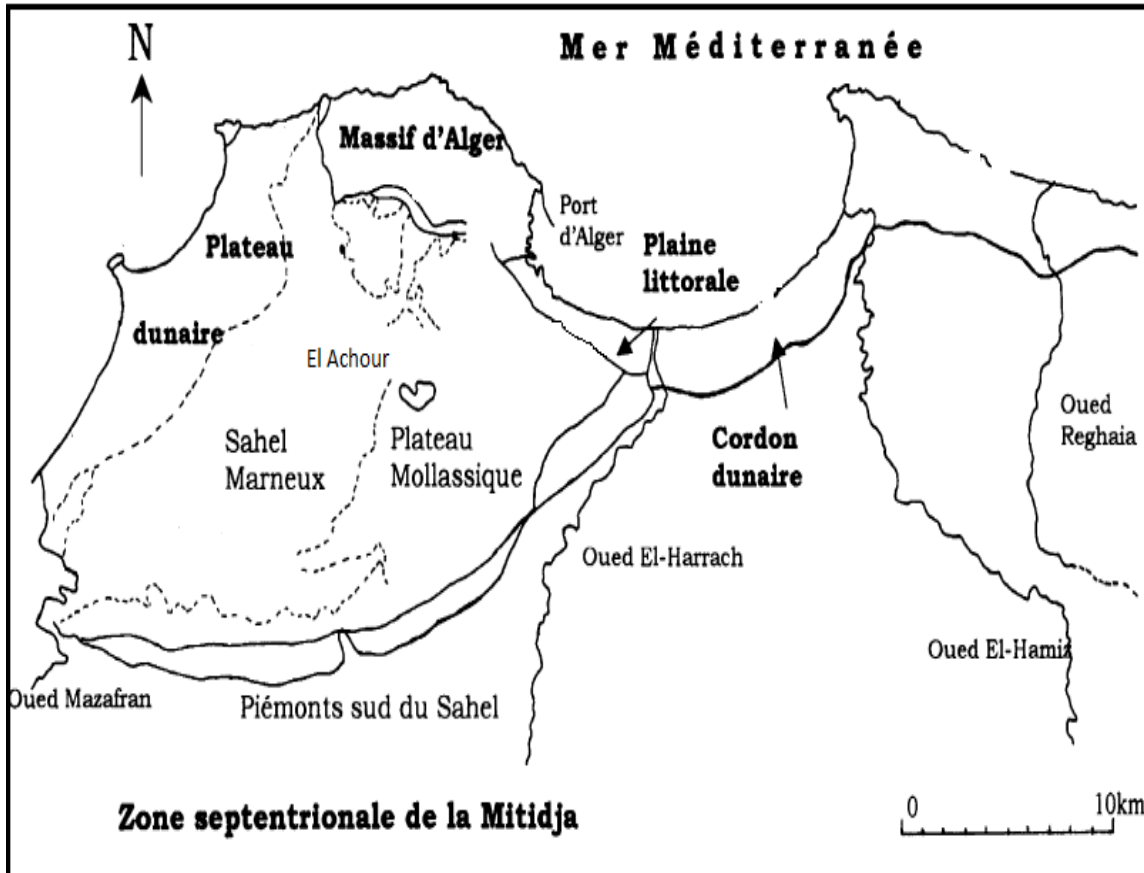


Fig.2-2 : Les grands ensembles géographiques de la région d'Alger
(Z. Derrich et C.Lounis, 2004).

est situé sur les terrains marneux d'âge Plais ancien à couverture grés-sableuse astienne, formant en particulier les plateaux d'El Achour et Ouled Fayet (figure.2-2). Ces derniers correspondent aux flancs SE et NO d'un pli anticlinal, d'échelle plurikilométrique de direction N30°E (Aymé, 1956).

Les marnes plais anciennes couvrent une large surface au sud-ouest d'Alger, région connue sous le nom du Sahel d'Alger. Elle représente le substratum sur lequel s'étend l'extension de la ville d'Alger.

Le Sahel est composé d'une succession de collines formées principalement des Marnes et argile du Plais ancien.

L'unité marneuse a une épaisseur de plus de 200 m et forme généralement un substratum homogène. Elle est surmontée par des matériaux altérés et fissurés. Dont l'épaisseur varie avec la pente et le contexte topographique.

Dans les zones où elles affleurent, les formations plais anciennes sont massives. Ailleurs elles sont recouvertes par des dépôts récents. En profondeur (à partir environ de 12 m), la marne est saine et se présente comme une roche compacte indurée à cassure su conchoïdale de couleur gris-bleu uniforme, elle est surmontée par une zone légèrement altérée et fissurée qui peut atteindre jusqu'à 8 mètres.

Près de la surface, la marne est très altérée, de couleur gris-jaune à verdâtre et dont l'épaisseur varie avec l'intensité de l'altération.

2-3/Méthodologie :

Pour atteindre notre objectif de recherche, notre travail est effectué en quatre étapes :

- Collecte de données géotechniques relatives aux sols argileux de la zone d'étude à partir de différents rapports des compagnes de reconnaissance effectuées dans le cadre de projet de construction.

Les données recueillies sur plus de 77 sondages ont été divisées en 5 zones en fonction de leur localisation (Figure.2-4). Les noms de zones, les sites ou districts inclus et les propriétés géotechniques disponibles dans les 5 zones sont répertoriés dans le tableau (2-7)

Organisation des données recueillies sous forme de tableau exploitable sur Excel :

- Analyse statistiques des propriétés géotechniques (physiques et mécaniques), en adoptant un intervalle de confiance de 95%
- Analyse factorielle des données en utilisant l'analyse en composantes principales, pour établis sir les différentes corrélations entre les paramètres
- Interprétation des résultats obtenus

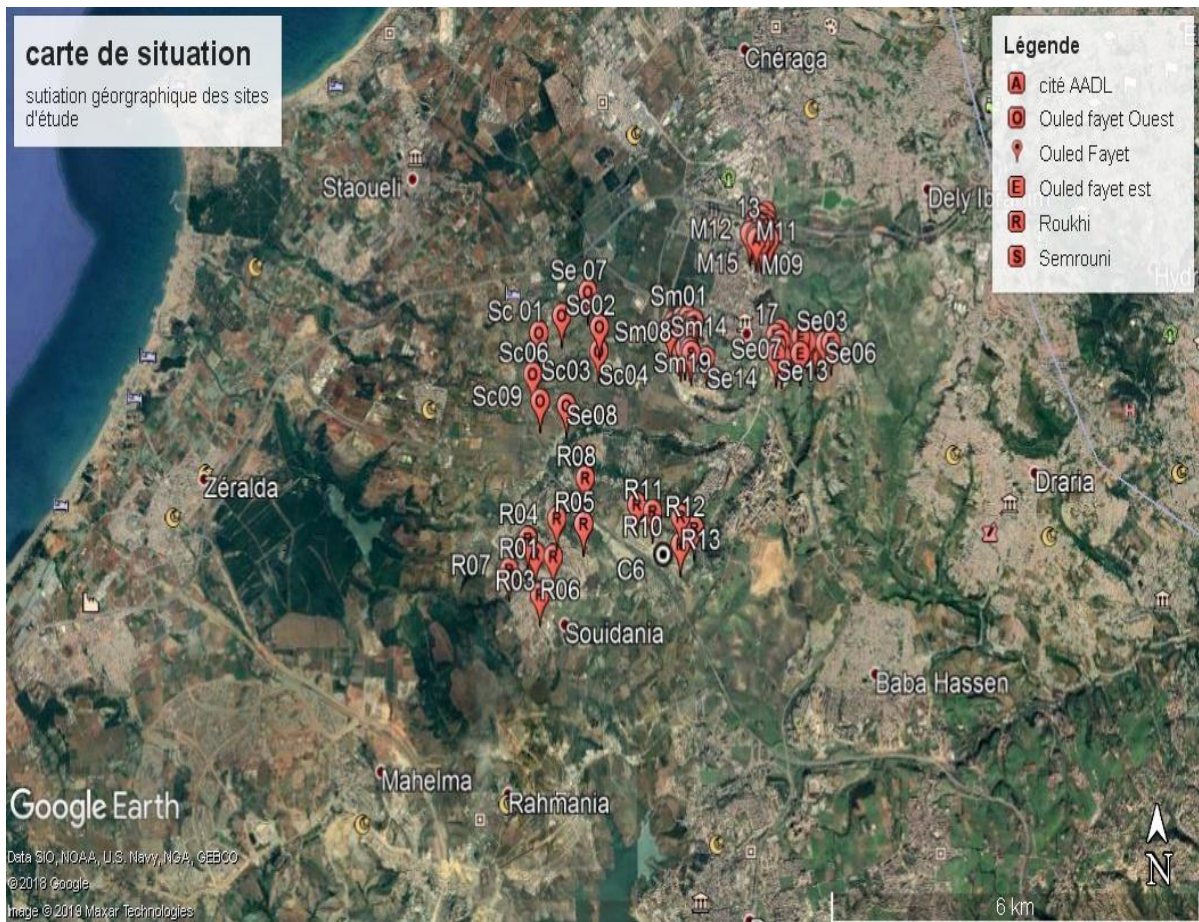


Fig.2-4 : localisation géographique des sondages (Google Earth 2019)

2-3.1 Collecte de données

Les données géotechniques ont été collectées des rapports de compagnes de reconnaissance effectuées par le laboratoire National de l'Habitat et de la Construction *_LNHC_ (Oued Smar), dans le cadre de projet de construction. Le choix du site a été porté sur la région d'Ouled Fayet.*

Les rapports suivants ont été consultés :

- .
 - Pos Plateau Semrouni-Alger (phase finale)
 - Pos Plateau Ouled Fayet Ouest (phase finale)
 - Pos Plateau Ouled Fayet Est (phase finale)
 - Pos Plateau Roukhi –Alger campagne d'investigation (phase II)

Les données ainsi collectés ont été organisé dans un format approprié à l'aide du tableur Microsoft Excel.

2-3.2 Les paramètres géotechniques étudié

❖ Les limites d'Atterberg :

Les limites d'Atterberg ont été déterminées conformément à la norme NFP94-051. Ces limites sont mesurées, avec un appareillage normalisé, sur le mortier, c'est fraction de sol qui passe au tamis

Le nombre total des données collectées est de 163 répartie comme suit (tableau2-1)

Tableau- 2 : Nombre totale des données collectées (limites d'Atterberg)

Les sites	Wl	Ip
Ouled Fayet est	10	9
Ouled Fayet ouest	5	5
Semrouni	10	10
Roukhi	11	11
1500 logements	46	46

a) -Indice de plasticité

L'indice de plasticité, noté I_p , est le paramètre le plus couramment utilisé pour caractériser l'argilosité des sols. C'est la différence entre la limite de liquidité et la limite de plasticité, (Costet et Sanglerat, 1975). Il s'exprime par la relation :

$$IP = Wl - WP$$

(47)

b) -La limite de liquidité (wl)

Caractérise la transition entre un état plastique et un état liquide. C'est la teneur en eau pondérale, exprimée en pourcentage, au-dessus de laquelle le sol s'écoule comme un liquide visqueux sous l'influence de son propre poids

❖ Analyse granulométrique :

Les analyses granulométrique ont été déterminées conformément à la norme NF P94-056, Les grains d'un sol ont des dimensions très variables pouvant aller de la dizaine de centimètres au micromètre. Un essai d'identification important consiste à étudier la granulométrie du sol, c'est à dire la distribution des grains suivant leur dimension en déterminant par pesée l'importance relative des classes de grains de dimensions bien définies (Costet et Sanglerat, 1975).

Les nombre totale de données collectées est de 154 répartie comme suit (tableau 2-2)

Tab.2-2 : Nombre totale des données collectées (Analyse granulométrique)

Les sites	5mm	2mm	0.08mm
Ouled Fayet est	10	10	10
Ouled Fayet ouest	5	5	5
Semrouni	10	10	10
Roukhi	11	11	11
1500 logements	-	-	46

❖ Sédimentométrie :

Les analyses sédimentométrie ont été déterminées conformément à la norme NF P94-057, Lorsque la dimension des particules est inférieure à 80 μ m le tamisage n'est plus possible. On a alors recours à la sédimentométrie Cette méthode est basée sur la loi de Stokes qui exprime la vitesse limite de chute d'une particule sphérique dans un liquide visqueux en fonction du diamètre de la particule, Costet et Sanglerat, 1975).

Les nombre totale de données collectées est de 72 répartie comme suit (tableau 2-3)

Tab2-3 : Nombre totale des données collectées (sédimentométrie)

Les sites	20 μ m	2 μ m
Ouled Fayet est	10	10
Ouled Fayet ouest	5	5
Semrouni	10	10
Roukhi	11	11
1500 logements	-	-

❖ Les paramètres de compressibilités

Le coefficient de gonflement (cg), coefficient de compression (ct) et la contrainte de pré consolidation (pc) ont été déterminées selon la norme -NF P94-090-1. Le nombre total de données collectées est de 159 répartie comme suit (tableau.2-4)

L'indice de compression, de gonflement et la contrainte de pré consolidation sont déterminés à partir de la courbe de compressibilité e-log σ (figure.2-5)

Tab.2-4 : Nombre totale des données collectées (œnométrique)

Les sites	Pc (bar)	ct	cg
Ouled Fayet est	6	6	6
Ouled Fayet ouest	4	4	4
Semrouni	7	7	7
Roukhi	3	3	3
1500 logements	33	33	33

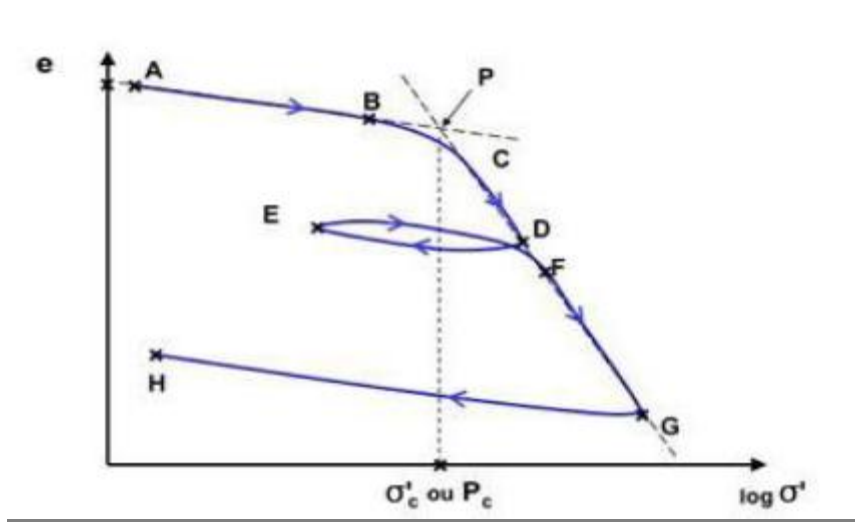


Fig2-5 : Courbe de la compressibilité à l'odomètre

❖ cisaillement

Cohésion et angle de frottement ont été obtenus conformément à la norme NF P94-071-1. Le nombre total de données collectées est de 70 répartie comme suit (tableau2-5) L'essai est réalisé sur au minimum 3 éprouvettes en augmentant à chaque fois la contrainte normale appliquée. On obtient ainsi les courbes de cisaillement effort-déformation et l'on peut en déduire les droites ($\tau ; \sigma_n$) pour les valeurs à la rupture et à l'état critique. Il est alors simple de déterminer l'angle de frottement ϕ et la cohésion C, respectivement la pente et l'ordonnée à l'origine de ces droites (figure.2-6)

Tab.2-5 : Nombre totale des données collectées (cisaillement)

Les sites	C	ϕ
Ouled Fayet est	4	4
Ouled Fayet ouest	3	3
Semrouni	4	4
Roukhi	6	6
1500 logements	18	18

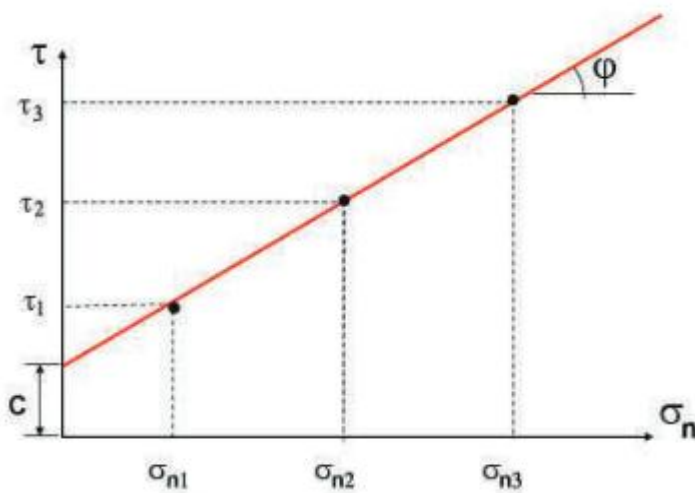


Fig.2-6 : Courbe de cisaillement effort-déformation

❖ teneur en eau W%

La teneur en eau ont été déterminées conformément à la norme NF P94-050

Il se détermine par deux pesées une première pesée de l'échantillon à l'état initial donne la masse m de l'échantillon humide et une deuxième pesée, après passage à l'étuve 105°C pendant 24 heures (évaporation de l'eau libre et de l'eau capillaire), donne la masse sèche de l'échantillon le nombre totale de données collectées est de 87 répartie comme suit (tableau2-6)

$$w = \frac{m_w}{m_s} \cdot 100 = \frac{w_w}{w_s} \cdot 100 \text{ Avec : } m_w = m - m_s$$

(48)

Tab.2-6 : Nombre totale des données collectées (teneur en eau (W%))

Les sites	W
Ouled Fayet est	10
Ouled Fayet ouest	5
Semrouni	15
Roukhi	11
1500 logements	46

❖ **Le poids volumiques humide et sec**

Le nombre total de données collectées est de 174 répartie comme suit (tableau.2-7)

Tab.2-7 : Nombre totale des données collectées.

Les sites	γ_d	γ_h
Ouled Fayet est	10	10
Ouled Fayet ouest	5	5
Semrouni	15	15
Roukhi	11	11
1500 logements	46	46

Tab.2-8: représentation générale des propriétés physiques , mécaniques , chimiques et les essais in situ dans chaque site d'étude

la zone d'étude	essai in-situ				essai en laboratoire															Essais chimiques								
	nombre des sondages	pénétration dynamique	fouilles de reconnaissance	Down Hole	densité sèche γ_d	densité humide γ_h	teneur en eau pondérale W%	degré de saturation Sr %	Granulométrie %			sédimentométrie %		limites d'Atterbeg		Résultat œdométrique			Gonflement Libre Pg (Bar)	Résistance à la compression R.C.S(Bar)	Cisaillemen rectiligne ou Triaxial		sulfates SO_4^-	Carbonates $CaCO_3$	Chlorures Cl^-	Matières organiques	insolubles	PH
									5 mm	2 mm	0,08 mm	20 μm	2 μm	WL %	Ip	Pc (Bar)	Ct	Cg			C (bar)	$\phi(^{\circ})$						
Ouled Fayet est	19	59	10	2	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	9	6	6	6	/	/	4	4	2	2	2	2	2	2
Fayet ouest	9	25	8	1	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	4	4	4	/	/	3	3	2	2	2	2	2	2
Semrouni	20	80	10	1	15	15	15	15	10	10	10	10	10	10	10	7	7	7	2	3	4	4	3	3	3	3	3	3
Roukhi	13	50	8	1	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	3	3	3	2	/	6	6	1	1	1	1	1	1
1500 logements	16	/	9	1	46	46	46	46	/	/	46	/	/	46	46	33	33	33	/	/	18	18	9	9	9	9	/	/

2-4/Conclusion :

Les sites étudiés sont composés d'une formation géologique formée essentiellement de marne et l'argile.

Dans ce chapitre on a présenté l'emplacement de la zone d'étude et les données disponibles relatives à cette zone.

De plus, la tâche de recherche est énoncée et les procédures appliquées pour atteindre les objectifs sont les suivantes décrites

3-1/ Introduction

Les investigations géotechniques sur site se par des échantillons dont la taille de l'échantillon contrôle le contenu de l'information et donc la représentativité de la compagne. Les méthodes statistiques permettent d'enquêter sur les résultats des tests (statistique descriptive), ainsi que l'estimation fondée de l'échantillon à la population (statistique déductive)

Afin d'évaluer les paramètres géotechniques ci-dessous, le logiciel XLSTAT a été utilisé. L'application d'analyses de données multi variées, nécessite le filtrage des données pour avoir une meilleure représentativité de la variation du sol. Pour l'analyse des relations, une matrice de corrélation a été utilisée. Les propriétés physiques et mécaniques des formations marneuses, objet de cette étude sont :

Les paramètres physiques :

- La teneur en eau w%,
- Le degré de saturation Sr ,
- Les limite d'Atterberg (Wl et Ip) ,
- Les poids volumique γ_d .
- Analyse granulométrique.

Les paramètres mécaniques :

- La cohésion C
- L'angle de frottement ϕ
- Contrainte de prés Consolidation P_c
- Le coefficient de compressibilité Ct
- Coefficient de gonflement Cg

3-2 / Présentation des données

Les données analysées proviennent de 77 sondages carottés à différentes profondeurs. Cent Soixante-dix 170 essais au pénétromètre dynamique ont été également analysées et des cartes d'iso-valeurs ont été établies dans trois profondeur. (tableau. 3-1)

Tab. 3-1: : Données géotechniques analysées.

	γ_d (t/m3)	W %	Sr %	γ_h (t/m3)	5 mm	2 mm	0,08 mm	20 μm	2 Mm	Wl (%)	IP	P_c (bar)	Ct	cg	C (bar)	Φ (°)	Rd (bar)
Nombre d'échantillons	87	87	87	87	36	36	82	35	35	82	81	53	53	53	35	35	170
Minimum	1.29	15	7	1.05	95	91	59	4	17	39	17	0.92	10.96	3.77	0.27	3.09	4.61971
Maximum	2.1	36	100	11.95	100	100	100	85	42	68	39	3.96	31.56	10.27	1.68	13	400

3-3 /Analyse statistique des données

En Accord avec DIN EN 1997-1 et l'eurocode 7 (sec. 2.4.5.2 (11)), la probabilité arithmétique d'une valeur ne doit pas dépasser 5% à l'état limite considéré si des méthodes statistiques sont appliquées. Dans ce contexte, une estimation prudente de la moyenne d'un ensemble limité de paramètres géotechniques correspond à une moyenne avec un niveau de confiance de 95%.

Les propriétés du sol présentent souvent des variations spatiales considérables. En utilisant des techniques statistiques, les ingénieurs géotechniciens peuvent quantifier le degré de variation spatiale des propriétés du sol ainsi que leur distribution, ce qui permet d'obtenir des estimations plus significatives sur des sites non échantillonnés et contribuer à la fiabilité des études. La valeur moyenne et l'écart type, respectivement, sont utilisés pour exprimer ces deux nombres (Degroote, 1996). Dans le cas des propriétés du sol, une distribution normale montre souvent déjà une conformité adéquate.

Cette distribution a l'attribut favorable que chaque combinaison linéaire de valeurs distribuées normales est à nouveau normalement distribué.

3-3.1 Les paramètres physiques

➤ *La teneur en eau:*

La teneur en eau présente des valeurs qui se rapprochent du maximum dans la plupart des sondages (Figure. 3-1). Le minimum est observé dans les couches superficielles pour certains sondages qui correspondent probablement à des dépôts fortement altérées (Figure.3-3). La valeur moyenne de la teneur en eau est de 26.4% et son écart type est de 4.69%. Bien que les dépôts marneux présentent des altérations importantes en surface, la teneur en eau varie peu. Il n'existe pas de corrélation significative entre la teneur en eau des dépôts marneux et la profondeur des échantillons.

Les statistiques descriptives de la teneur en eau sont présentées dans le tableau (3_2) suivent :
La teneur en eau suit une loi de distribution normale (Figure.3-2)

Tab. 3-2: Statistiques descriptives de la teneur en eau w%.

Statistique	w%
Nb. d'observations	88
Minimum	15.000
Maximum	36.000
1er Quartile	23.750
Médiane	27.500
3ème Quartile	30.000
Moyenne	26.403
Variance (n-1)	22.080
Ecart-type (n-1)	4.699

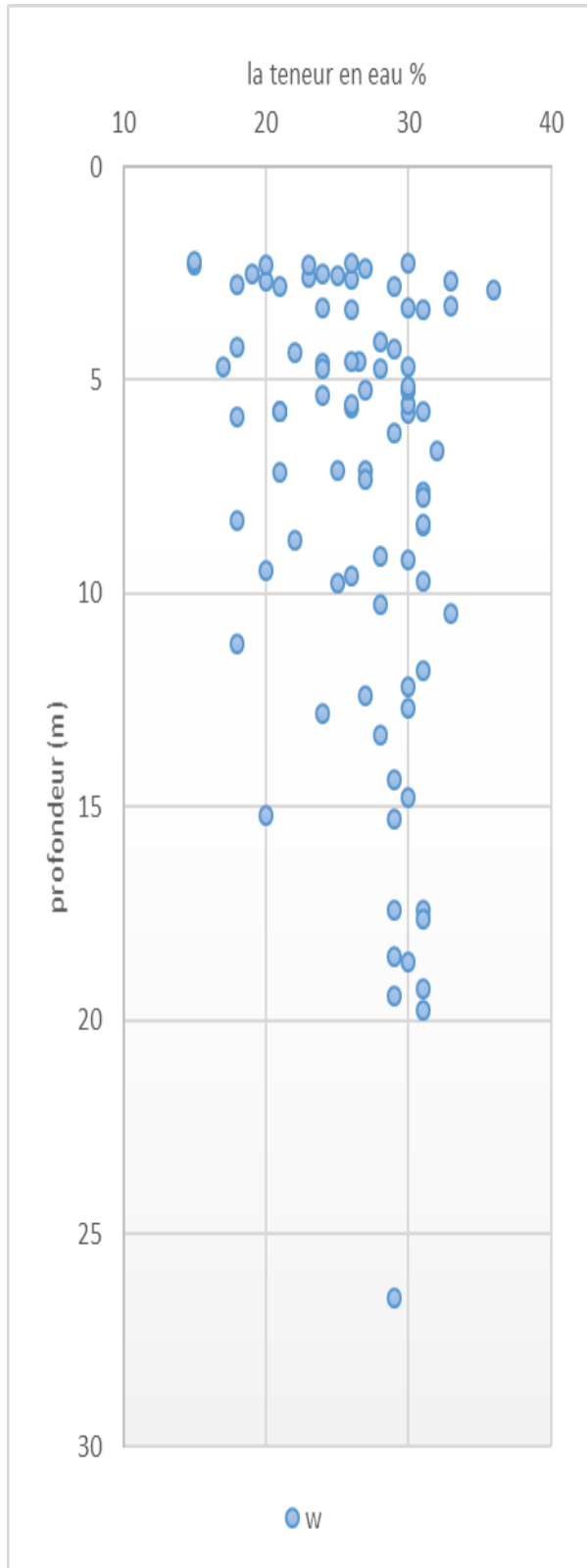


Fig. 3-1 : Distribution de la teneur en eau en fonction de la profondeur

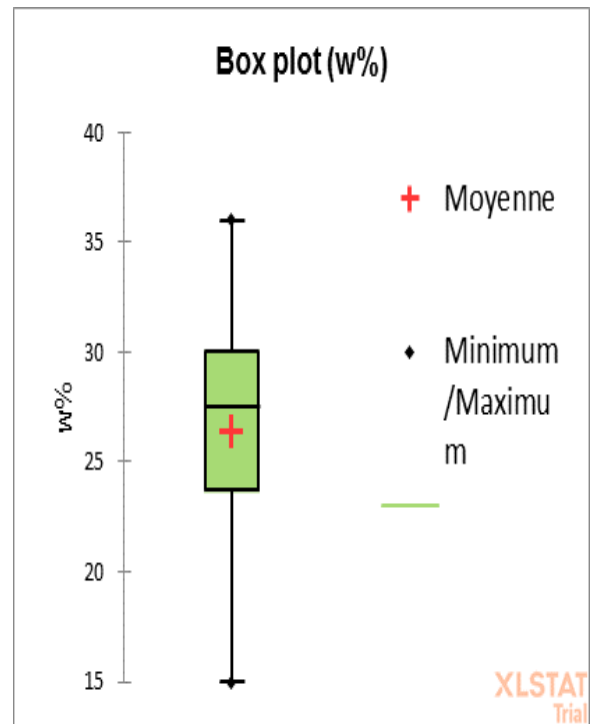
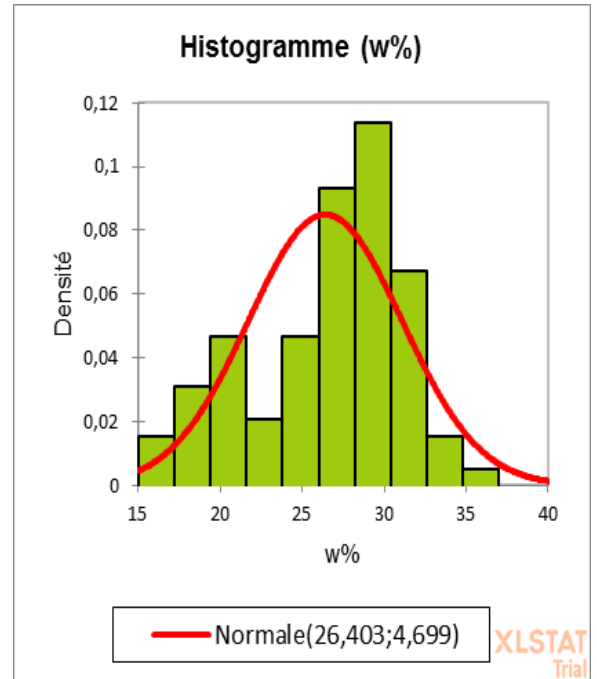


Fig. 3-3 : Boîte représentative de la teneur en eau statistiques

Interprétation : Le minimum est observé dans les couches superficielles pour certains sondages qui correspondent probablement à des dépôts fortement altérés

➤ *Le degré de saturation Sr %*

Les valeurs de degré de saturation Sr%, montre que le terrain est saturé (figure. 3-4). La valeur moyenne est de 94.432% et l'écart type 10.332 % (figure.3-6).

La distribution du degré de saturation est donnée dans la (fig.3-5).

Tab. 3-3 : Statistiques descriptives du degré de saturation

Statistique	sr%
Nb. d'observations	88
Minimum	7.000
Maximum	100.000
1er Quartile	93.000
Médiane	96.000
3ème Quartile	99.000
Moyenne	94.432
Variance (n-1)	106.754
Ecart-type (n-1)	10.332

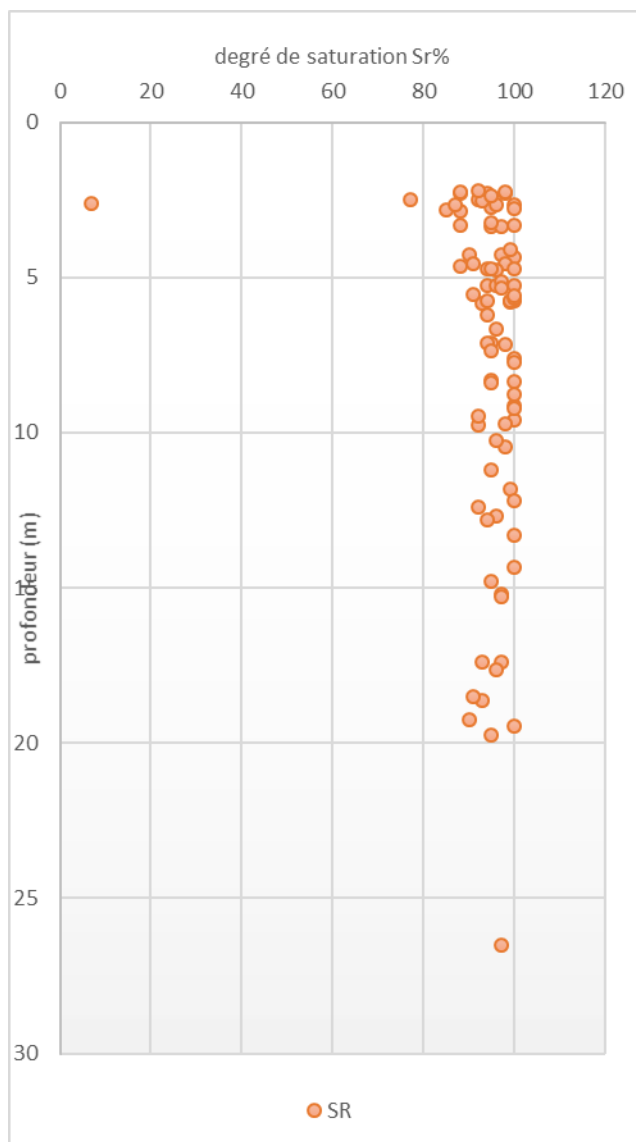


Fig. 3-4 : Distribution de degré de saturation en fonction de la profondeur

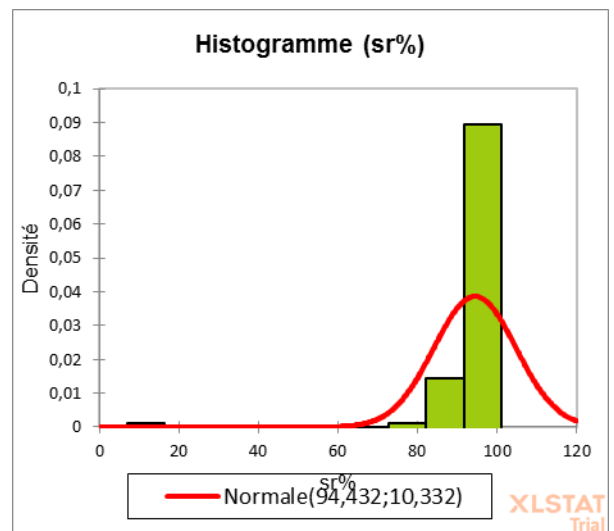


Fig. 3-5: Loi de distribution de Sr %

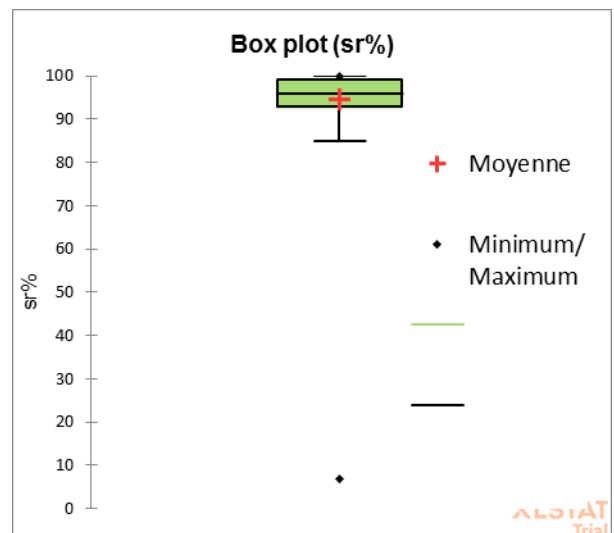


Fig. 3-6 : Boite représentative de degré de saturation Sr%

Les valeurs de Limite de liquidité varient de 35% à 68 %, avec une valeur moyenne de 56.181 % et écart type 7.211% (tableau. 3-4) (figure.3-9). Les valeurs les plus élevées sont observées dans les couches superficielles, ce qui confirme l'altération de ces couches (Figure3-7). La limite de liquidité suit une loi normale de distribution (Figure.3-8)

Tab.3-4 : Statistiques descriptives de la limite e liquidité

Statistique	wl(%)
Nb. d'observations	83
Minimum	35.000
Maximum	68.000
1er Quartile	53.500
Médiane	58.000
3ème Quartile	61.000
Moyenne	56.181
Variance (n-1)	52.004

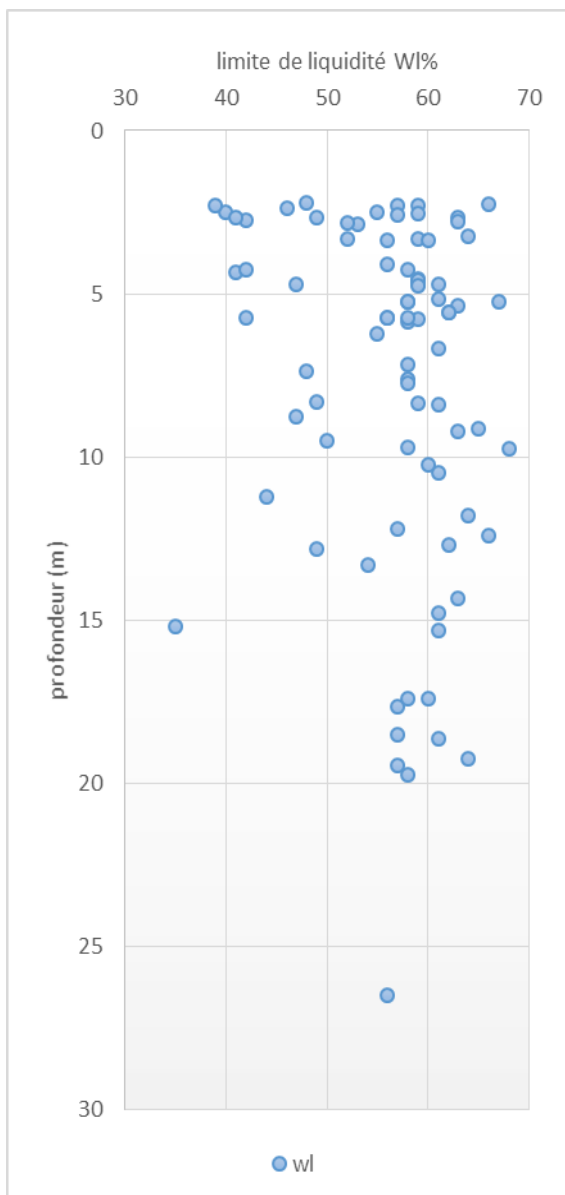


Fig 3-7: Distribution de la limite de liquidité WL% en fonction de la profondeur

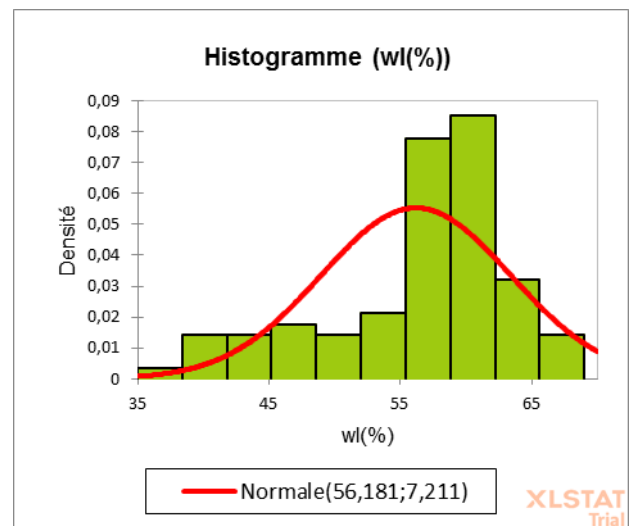


Fig3-8 : Loi de distribution de WI

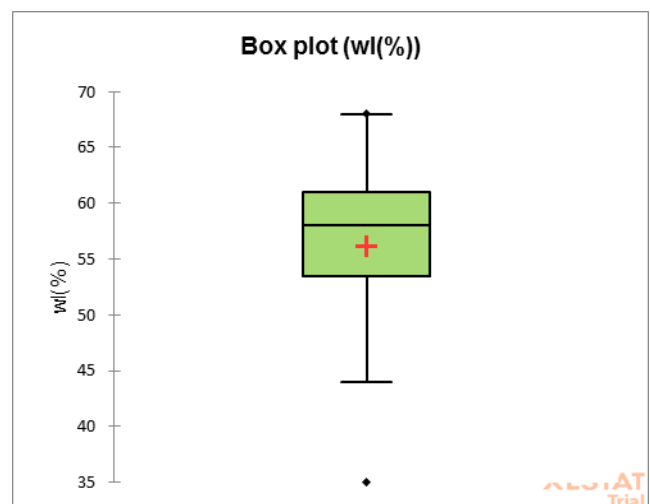


Fig.3-9: Boite représentative de limite de liquidité

➤ **Indice de plasticité IP**

avec une valeur moyenne de 28.915 et écart type de 4.220(Figure3-12). Selon l'hypothèse de Lumb (1966), étant donné que les deux limites suivent la distribution normale. L'indice de plasticité, qui est la différence entre les deux paramètres, devrait également suivre la distribution normale (A. T. Yeung, 2002)(Figure3-11)

Tab.3-5 : Statistiques descriptives de l'indice de plasticité

Statistique	IP
Nb. d'observations	82
Minimum	17.000
Maximum	39.000
1er Quartile	27.000
Médiane	29.000
3ème Quartile	31.000
Moyenne	28.915
Variance (n-1)	17.807
Ecart-type (n-1)	4.220

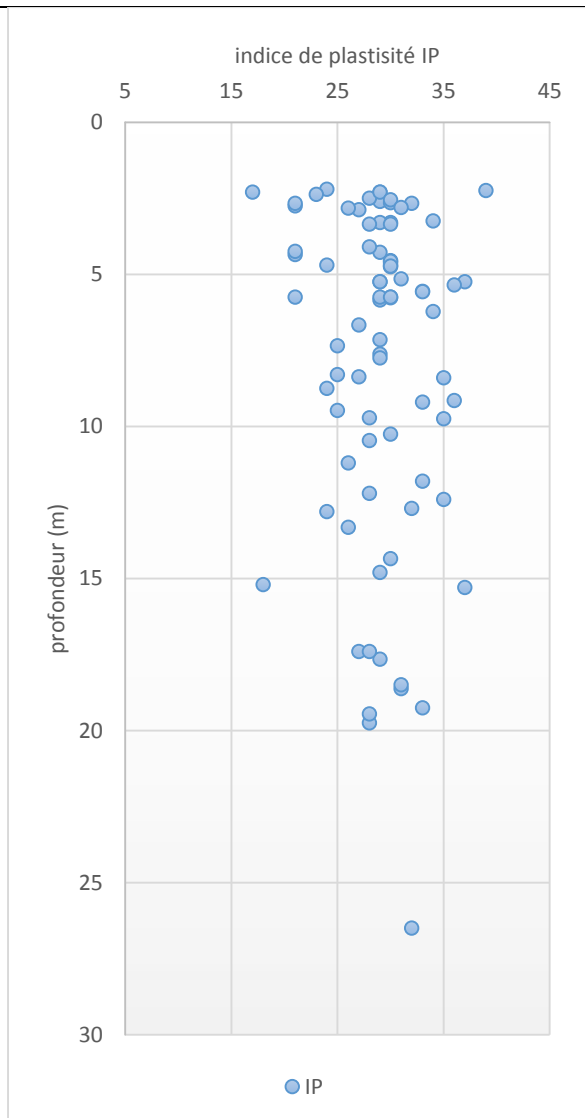


Fig.3-10 : Distribution de l'indice de plasticité IP

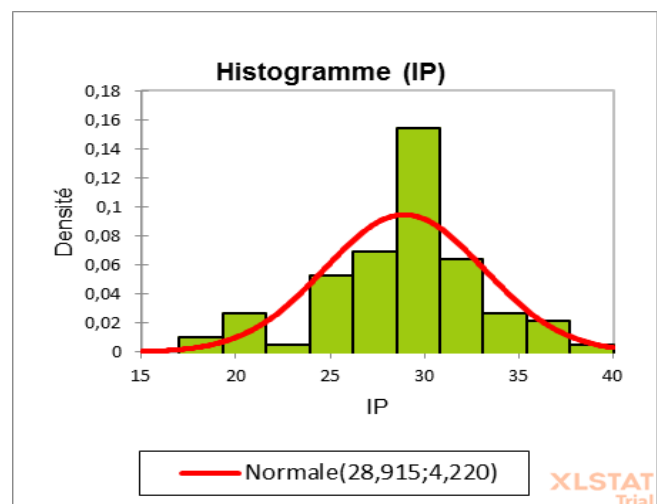


Fig.3-11 : Loi de distribution d'IP

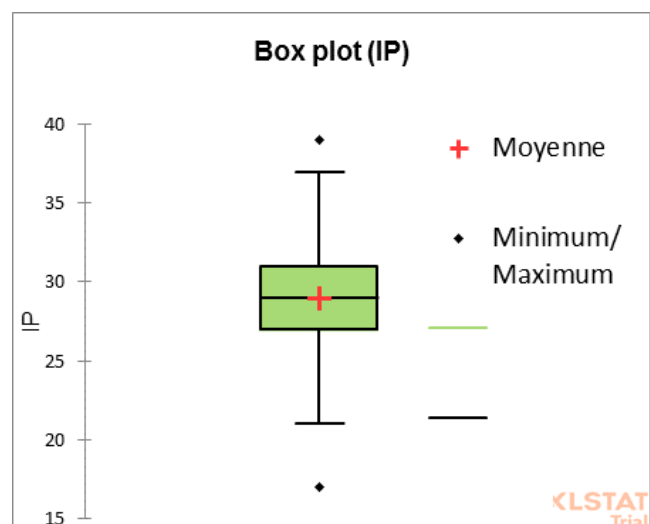


Fig.3-12 : Boîte représentative de l'indice de plasticité IP

➤ *Le poids volumique sec γ_d (t/m³) :*

Les valeurs de poids unitaire sec varient dans une gamme étroite allant de 1.290(t/m³) à 2.100 (t/m³)(tableau.3-6), avec valeur moyenne de 1.557 (t/m³)et écart type de 0.132 (t/m³)(Figure.3-15)

Tab.3-6 : Statistiques descriptives du poids volumique sec

Statistique	γ_d (t/m ³)
Nb. d'observations	88
Minimum	1.290
Maximum	2.100
1er Quartile	1.470
Médiane	1.510
3ème Quartile	1.600
Moyenne	1.557
Variance (n-1)	0.018
Ecart-type (n-1)	0.132

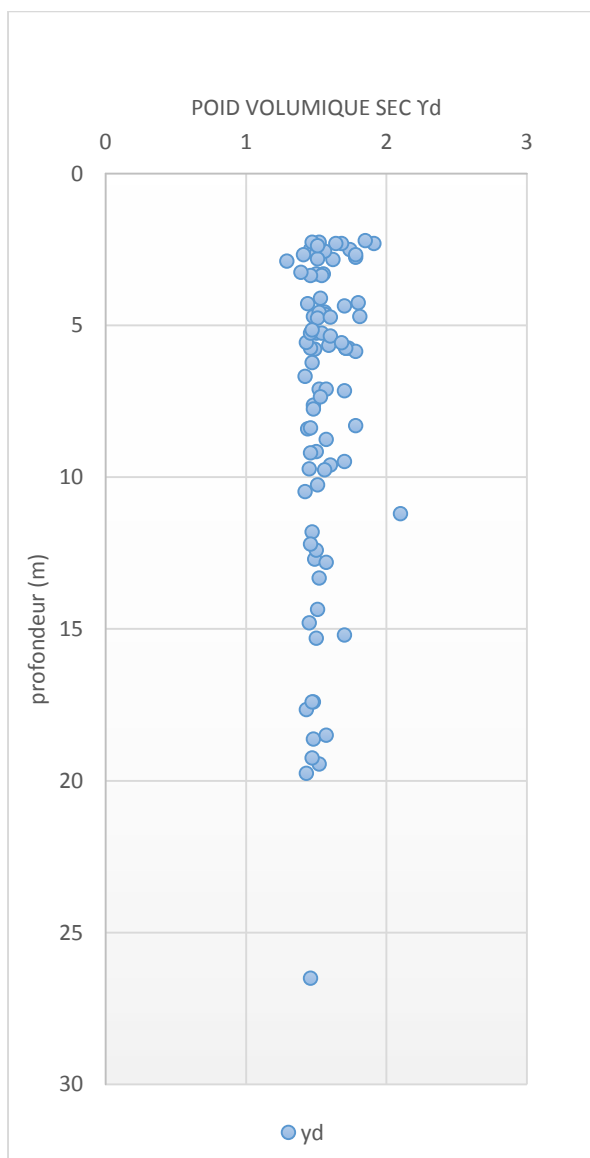


Fig.3-13 : Distribution de Le poids volumique sec

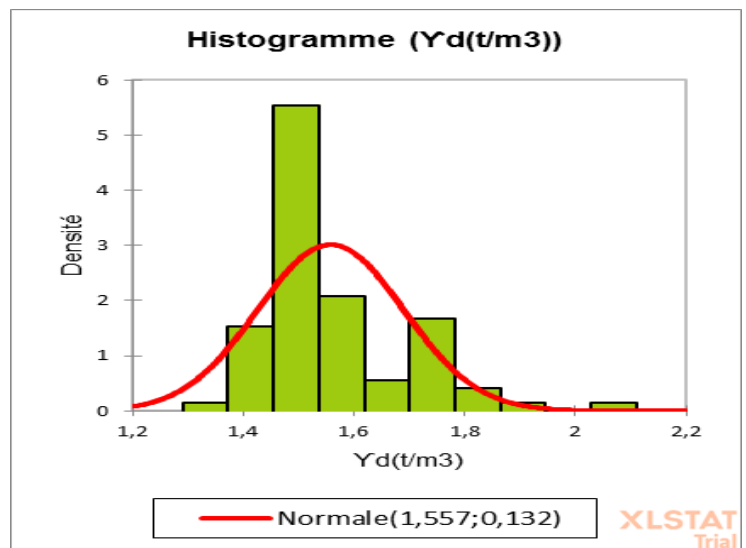


Fig.3-14 : Loi de distribution de γ_d

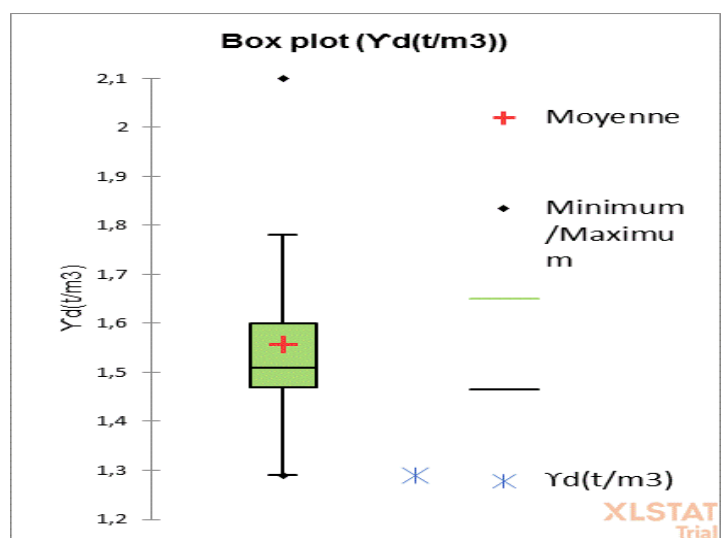


Fig.3-15: Boite représentative de poids volumique sec

➤ **Granulométrie (passant 0.08 mm) :**

Le passant au 80 micromètre est largement supérieur à 35% sur toute la profondeur étudiée (figure.3-16). Le sol étudié est un sol fin.

Tab3-7 : Statistiques descriptives de granulométrie 0.08 mm

Statistique	0,08mm
Nb. d'observations	48
Minimum	59.000
Maximum	99.000
1er Quartile	92.750
Médiane	98.000
3ème Quartile	98.000
Moyenne	90.729
Variance (n-1)	179.861

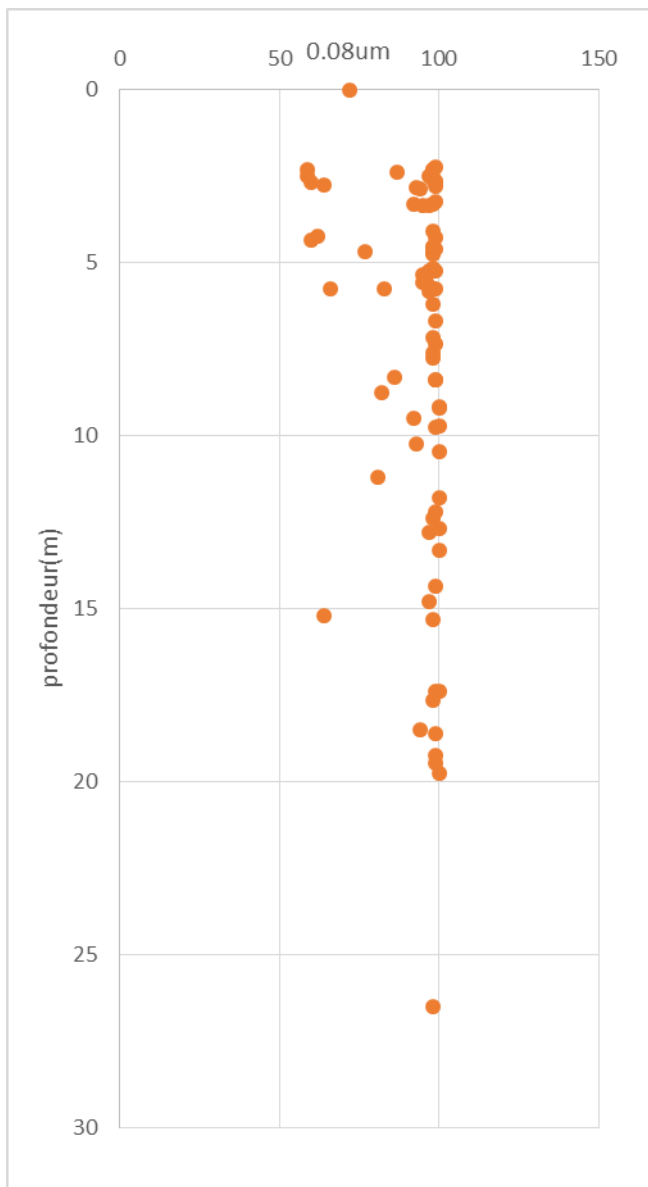


Fig.3-16 : Distribution de Granulométrie 0.08 mm en fonction de la profondeur

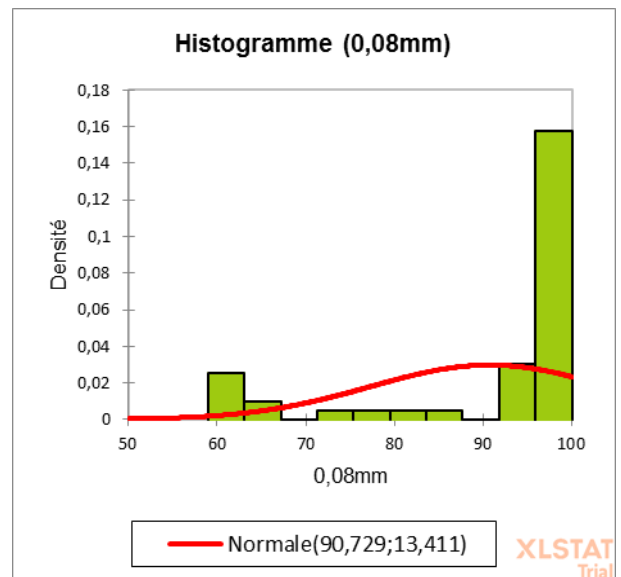


Fig.3-17 : Loi de distribution de granulométrie 0.08 mm

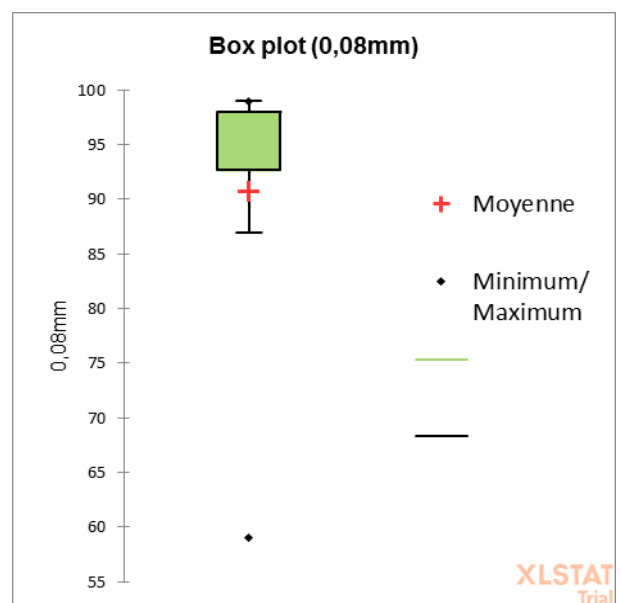


Fig.3-18 : Boite représentative de granulométrie 0.08 mm

➤ Sédimentométrie 2µm

La valeur moyenne est 33.531 et écart type 7.783

Tab.3-8 : Statistiques descriptives de Sédimentométrie 2µm

Statistique	2µm
Nb. d'observations	32
Minimum	17.000
Maximum	42.000
1er Quartile	29.750
Médiane	36.000
3ème Quartile	39.000
Moyenne	33.531
Variance (n-1)	60.580
Ecart-type (n-1)	7.783

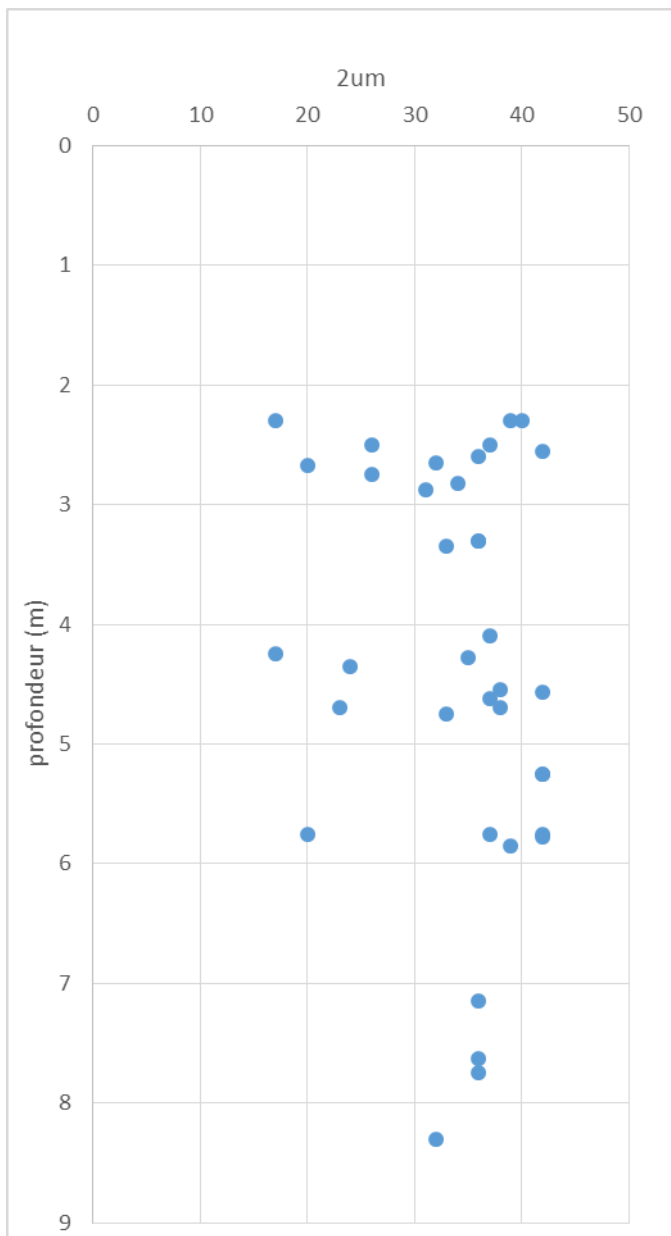


Fig.3-19 : Distribution de Sédimentométrie 2µm en fonction de la profondeur

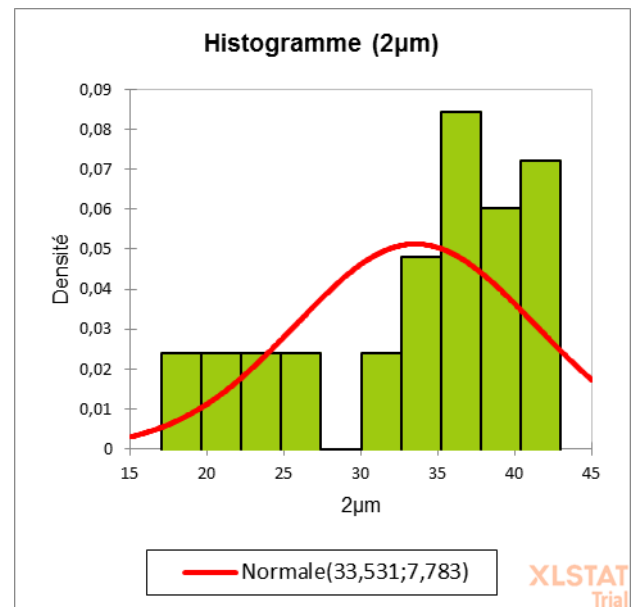


Fig.3-20 : Loi de distribution de Sédimentométrie 2µm

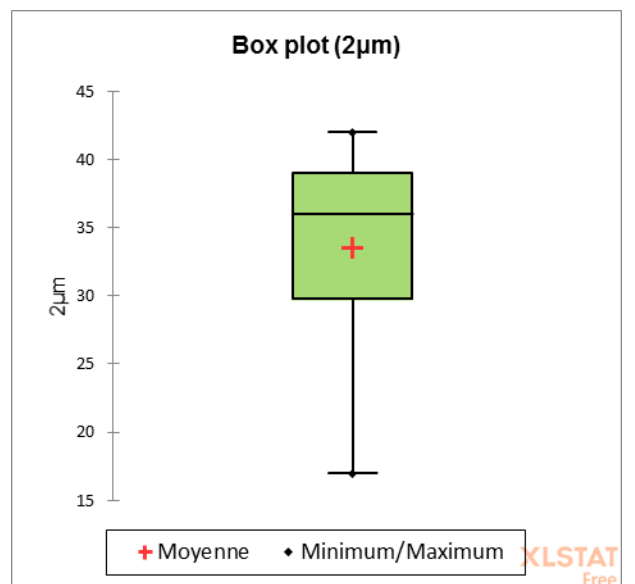


Fig.3-21 : Boite représentative de Sédimentométrie 2µm

3-3.2/ Paramètre mécanique

➤ *La cohésion C (bar)*

La valeur moyenne de la cohésion est de 0.624 (bar) et son écart type est de 0.303 (bars). D'après la figure (3-24) la cohésion tend à augmenter avec la profondeur dans la plupart des sondages. Ceci est due probablement à l'effet combiné de l'altération et la présence d'eau.

Tab.3-9 : Statistiques descriptives de la Cohésion

Statistique	c(bar)
Nb. d'observations	38
Minimum	0.270
Maximum	1.680
1er Quartile	0.405
Médiane	0.525
3ème Quartile	0.748
Moyenne	0.624
Variance (n-1)	0.092
Ecart-type (n-1)	0.303

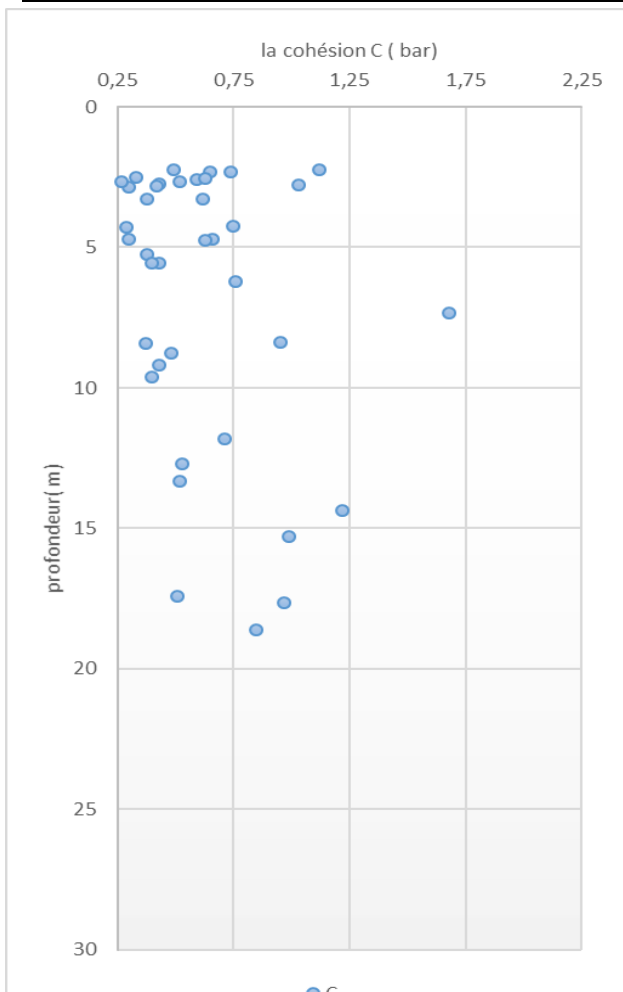


Fig.3-22 : Distribution de la cohésion en fonction de profondeur

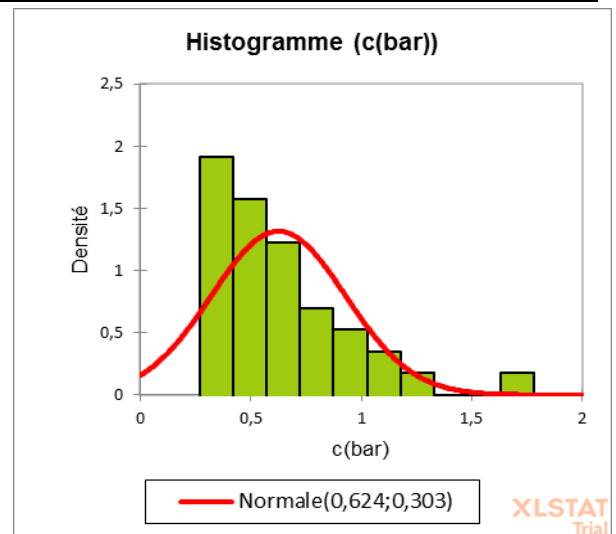


Fig.3-23 : Loi de distribution de la cohésion C

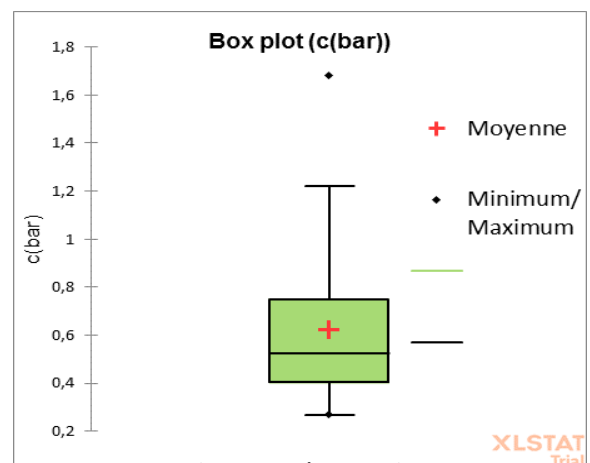


Fig.3-24 : Boite représentative de la cohésion

Tab.3.-10: Statistiques descriptives de l' Angle de frottement $\phi(^{\circ})$.

Statistique	$\phi(^{\circ})$
Nb. d'observations	35
Minimum	3.090
Maximum	13.000
1er Quartile	7.470
Médiane	9.970
3ème Quartile	11.945
Moyenne	9.483
Variance (n-1)	7.579
Ecart-type (n-1)	2.753

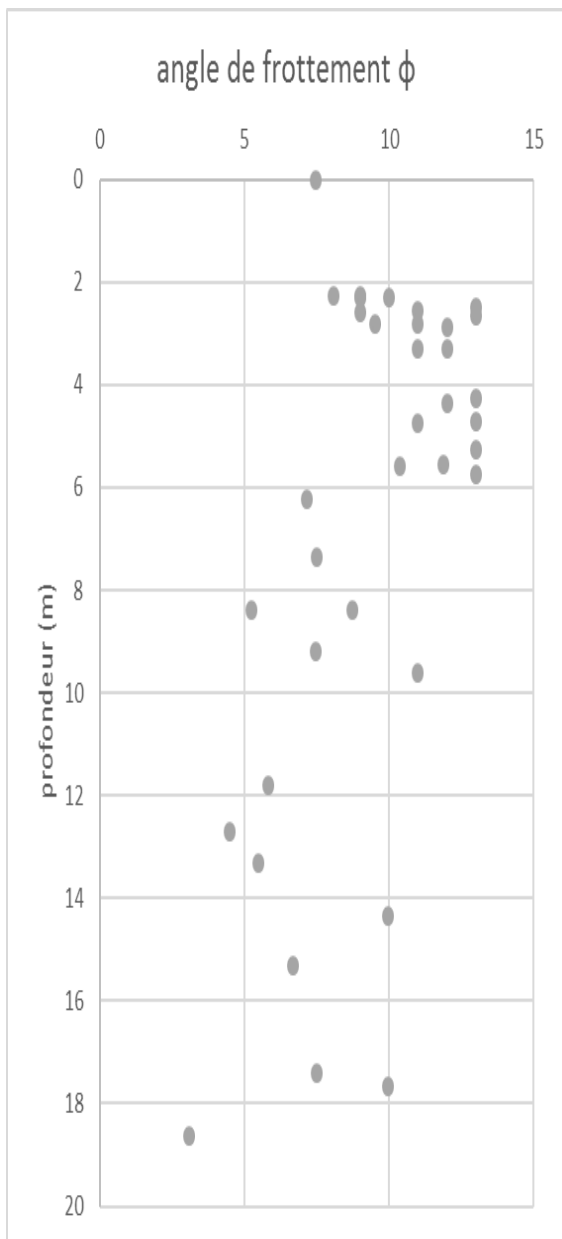


Fig.3-24 : Distribution de l'Angla de frottement

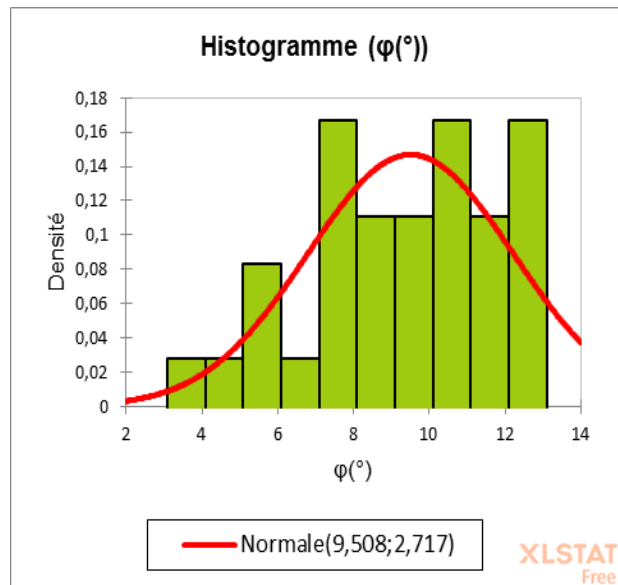


Fig.3-25: Loi de distribution de l'angle de frottement

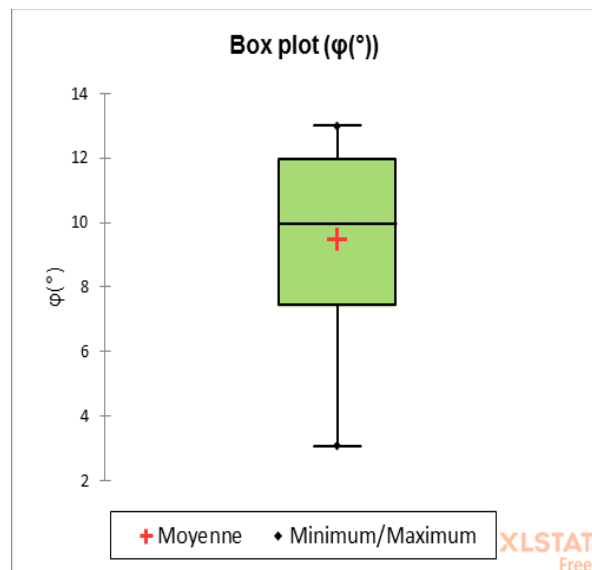


Fig.3-26 : Boite représentative de l'angle de frottement

➤ *Contrainte de prés Consolidation Pc*

Dans la plupart des sondages la contrainte de pré consolidation montre homogénéité en fonction de la profondeur. Mis à certains sondages qui présentent des valeurs plus élevées.

Tab.3-11: Statistiques descriptives de la Contrainte de prés Consolidation Pc

Statistique	pc(bar)
Nb. d'observations	26
Minimum	1.360
Maximum	3.960
1er Quartile	1.658
Médiane	2.040
3ème Quartile	3.743
Moyenne	2.620
Variance (n-1)	1.116
Ecart-type (n-1)	1.056

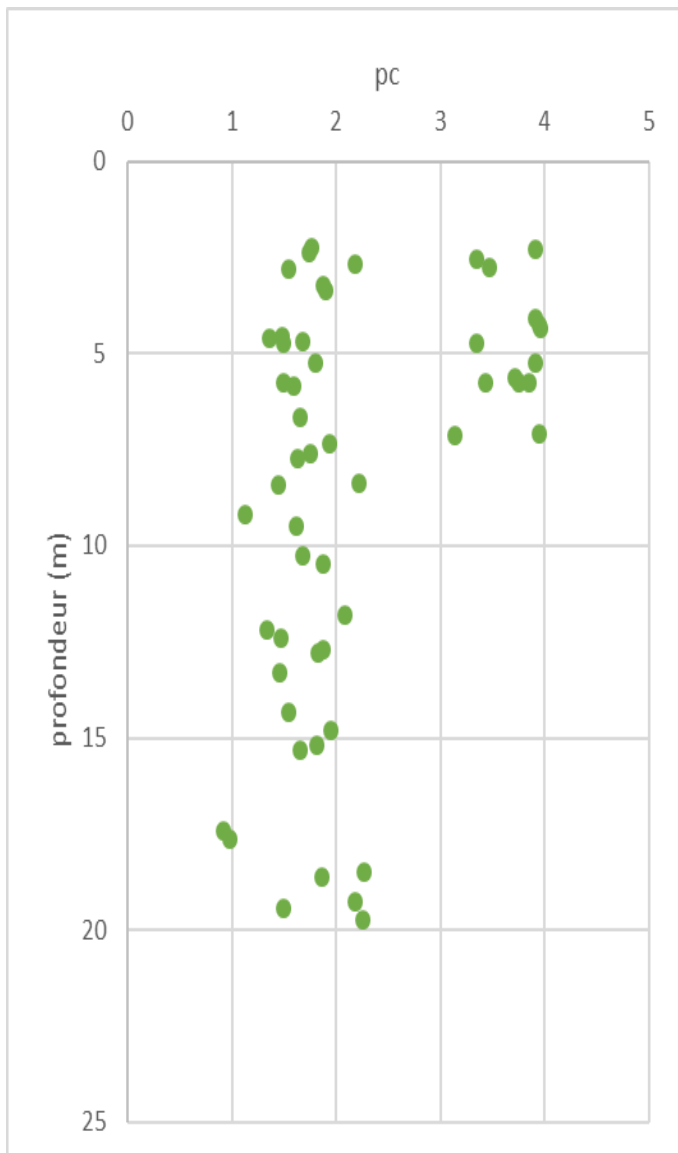


Fig3-27: Distribution de la Contrainte de prés Consolidation Pc en fonction de profondeur

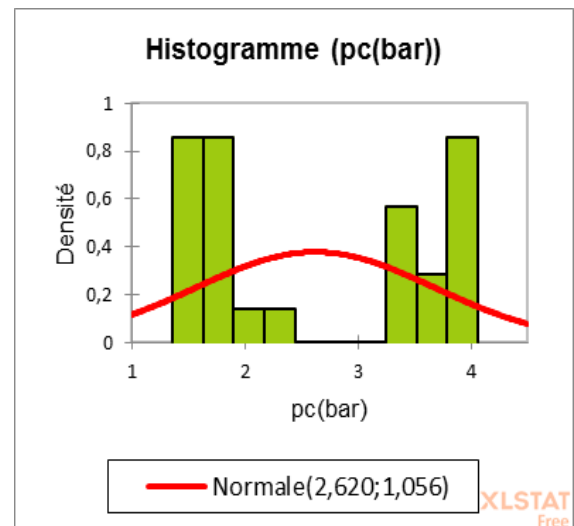


Fig.3-28 : Loi de distribution de la Contrainte de prés Consolidation Pc

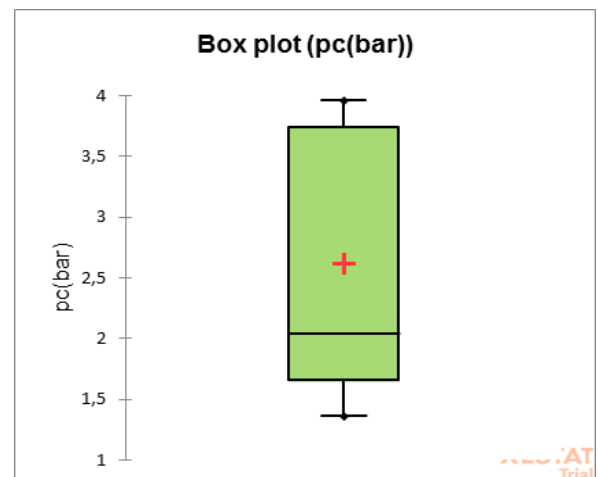


Fig.3-29 : Boite représentative de la Contrainte de prés Consolidation Pc

➤ **Le coefficient de compressibilité Ct**

L'analyse statistique de ce paramètre montre une faible variation avec la profondeur (Figur.3-30). Les valeurs minimum, maximum et moyenne, montre qu'on est en présence de terrains sur consolidé.

Tab3-12: Statistiques descriptives de Le coefficient de compressibilité Ct

Statistique	Ct
Nb. d'observations	25
Minimum	10.960
Maximum	31.560
1er Quartile	14.950
Médiane	17.960
3ème Quartile	22.290
Moyenne	18.376
Variance (n-1)	22.237
Ecart-type (n-1)	4.716

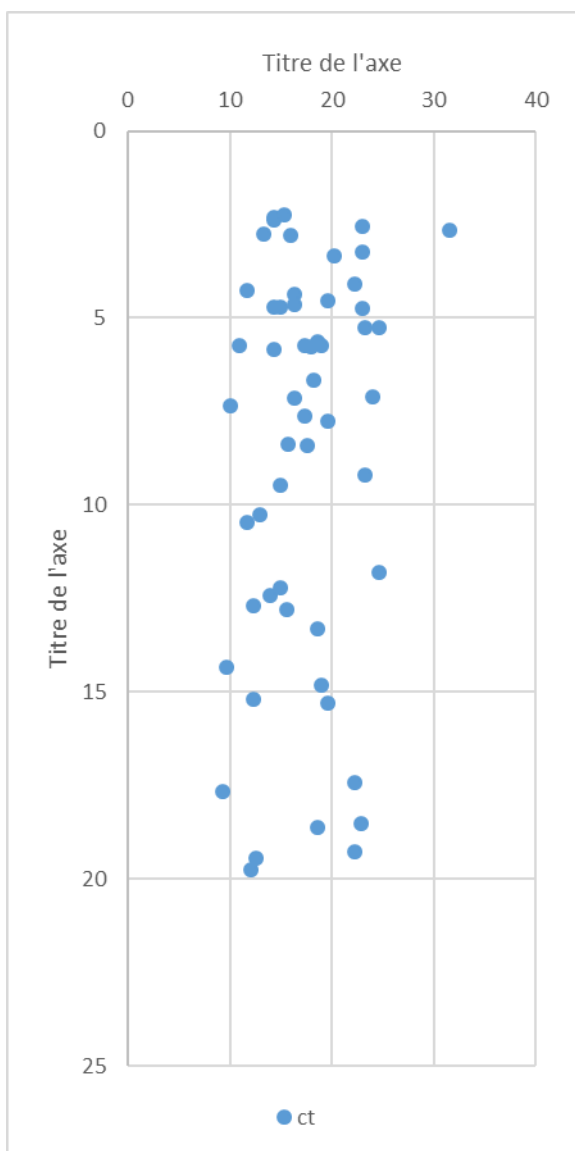


Fig3-30: Distribution de Le coefficient de compressibilité Ct

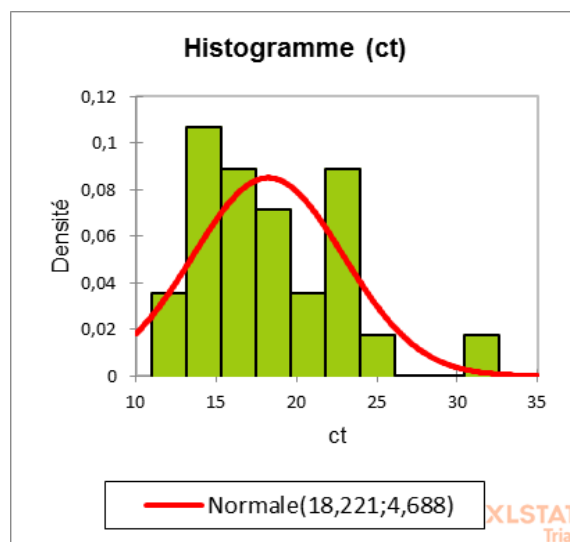


Fig.3-31 : Loi de distribution de Le coefficient de compressibilité Ct

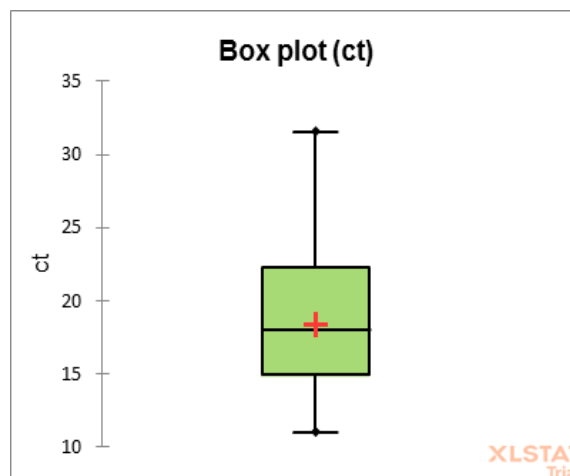


Fig.3-32 : Boite représentative de Le coefficient de compressibilité Ct

Le coefficient de gonflement varie de 3.70 % à 10.27. Avec une moyenne de 6.97. Ces valeur montre que le sol étudié et moyennement gonflant. L'écart type et la variance montre une faible dispersion de ce paramètre

Tab3-13 : Statistiques descriptives de Le Coefficient de gonflement Cg

Statistique	Cg
Nb. d'observations	25
Minimum	3.770
Maximum	10.270
1er Quartile	5.350
Médiane	7.460
3ème Quartile	8.410
Moyenne	6.979
Variance (n-1)	3.964
Ecart-type (n-1)	1.991

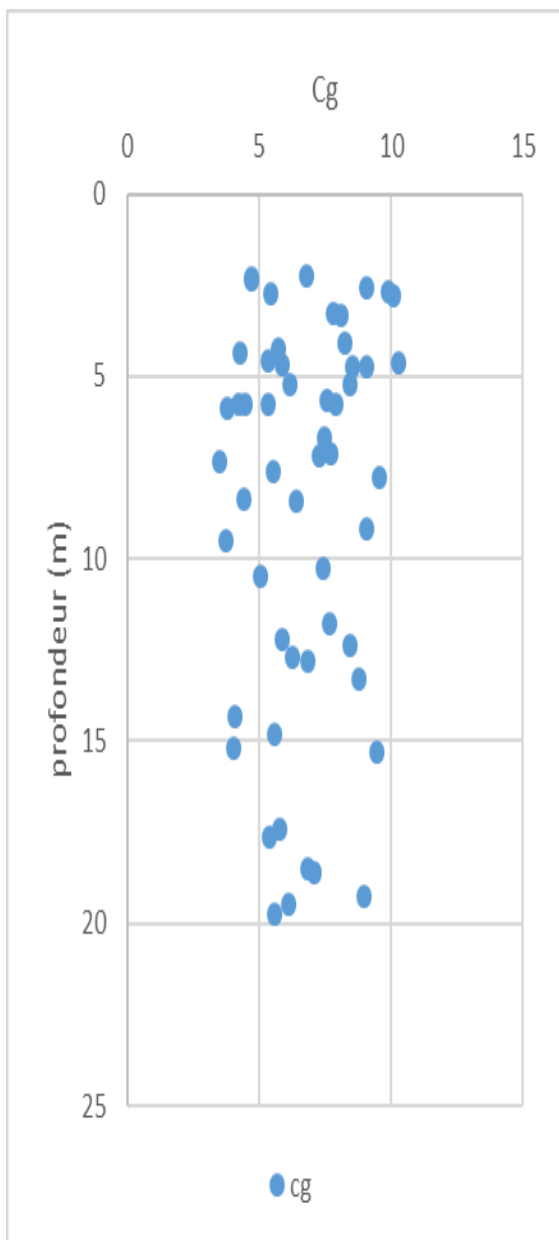


Fig3-33: Distribution de Le coefficient de de gonflement Cg

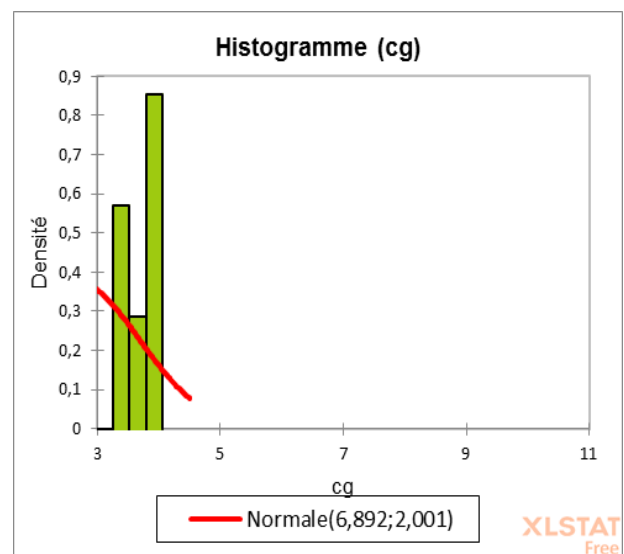


Fig.3-34 : Loi de distribution de Le coefficient de gonflement Cg

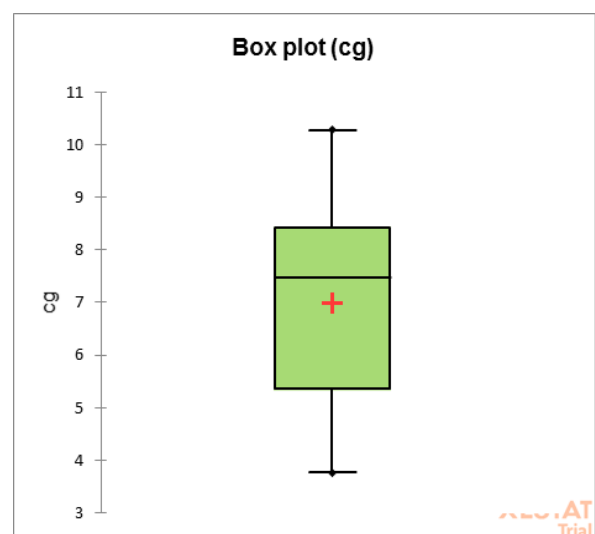


Fig.3-35 : Boite représentative de Le coefficient de gonflement Cg

3-4/ récapitulatif de l'analyse statistique univariable

1°) Du point de vue statistique : à partir du tableau. (3-14) au dessus, on peut constater que les paramètres géotechniques mieux positionnés sont: le degré de saturation (S_r) et la granulométrie (5 mm, 2mm) parce qu'ils présentent les plus grandes moyennes mais ils ne sont pas les plus hétérogènes.

Le paramètre plus hétérogène, est le passant au 20 μm parce qu'il présente le plus grand écart-type. L'écart-type traduit l'hétérogénéité d'un paramètre, c'est-à-dire, sa dispersion spatiale. Plus un paramètre présente un écart-type important que les autres, plus grand sera son poids et son importance.

2°) Du point de vue géotechnique : les densités sèches oscillent entre 1.29(t/m^3) à 2.10(t/m^3) mettant en évidence une formation moyennement dense. Le degré de saturation est appréciable détrempee à saturée. Les essais de compressibilité à l'oedomètre montre qu'il s'agit des formations surconsolidées, l'indice de compressibilité dénote formations peu compressibles. Les courbes de cisaillement démontrent un sol moyennement frottant et cohérent

Tab.3-14 : Description statistique des parametres Géotechniques

Statistique	w%	sr%	Yh(t/m3)	c(bar)	wl(%)	IP	pc(bar)	Ct	cg	5mm	2mm	0,08mm	20µm	2µm	Yd(t /m3)
Nb. d'observations	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
Minimum	15.000	7.000	1.750	0.270	0.000	0.000	1.360	10.960	3.770	95.000	91.000	59.000	4.000	17.000	1.290
Maximum	36.000	100.000	2.190	1.120	67.000	39.000	3.960	31.560	10.270	100.000	100.000	99.000	85.000	42.000	2.100
1er Quartile	21.250	92.000	1.903	0.380	52.000	27.000	1.658	14.485	5.350	99.500	96.000	92.750	46.500	29.750	1.470
Médiane	26.000	95.000	1.945	0.505	58.000	29.000	2.040	17.630	7.115	100.000	100.000	98.000	76.000	36.000	1.510
3ème Quartile	30.000	98.750	2.025	0.653	59.000	30.000	3.743	21.783	8.370	100.000	100.000	98.000	79.750	39.000	1.600
Moyenne	25.450	92.900	1.966	0.547	54.204	28.083	2.620	18.221	6.892	99.156	98.188	90.729	65.313	33.531	1.557
Variance (n-1)	25.003	177.153	0.009	0.051	116.582	36.078	1.116	21.977	4.006	2.459	7.835	179.861	502.867	60.580	0.018
Ecart-type (n-1)	5.000	13.310	0.093	0.225	10.797	6.006	1.056	4.688	2.001	1.568	2.799	13.411	22.425	7.783	0.132

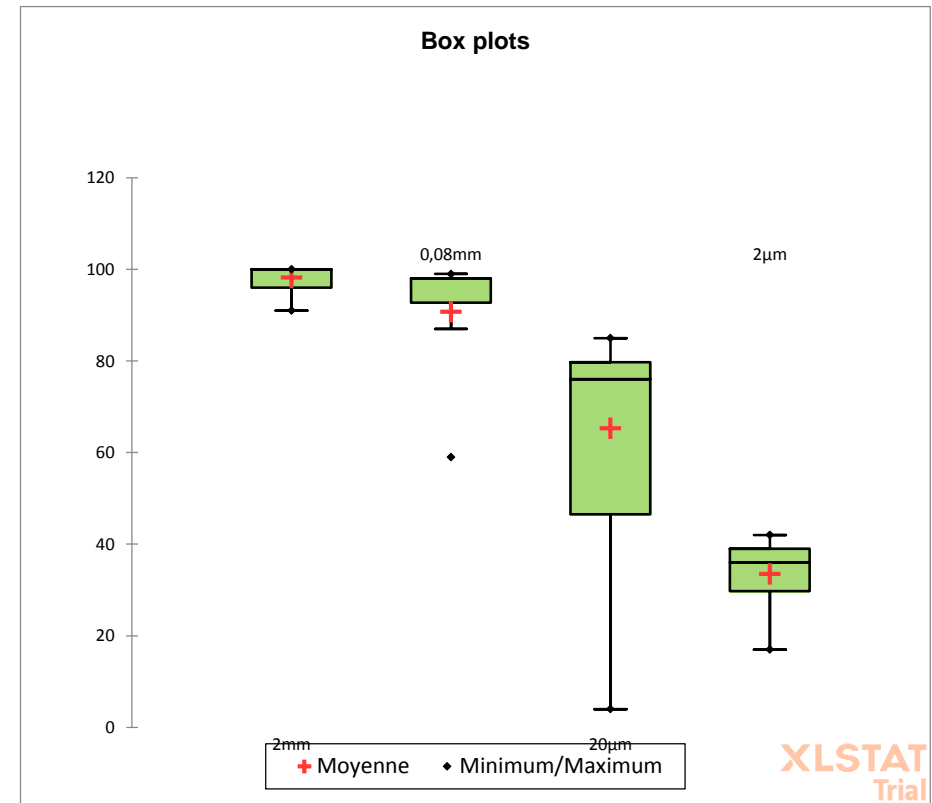
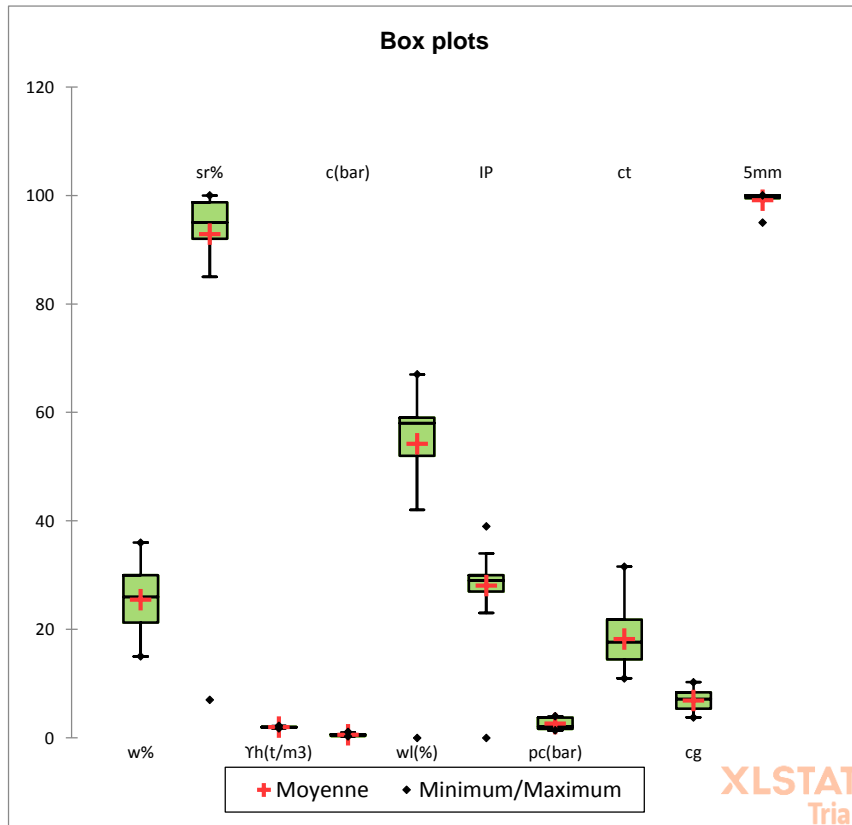


Fig.3-36 : Boite représentative global

3-5 /l'analyse statistique multi-variables :

L'analyse factorielle, utilisée dès les années 1970 pour des applications de géotechnique (Pouget et al, 2000) offre des possibilités complémentaires pour déterminer les relations existant à l'intérieur d'un ensemble de paramètres.

Les analyses en composantes principales présentées dans cette étude ont été réalisées au moyen du logiciel EXCEL STAT. Le calcul fournit :

- 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 caractères est réalisée sur l'espace principal considéré.

En général, le plan est défini par deux axes factoriels F1 et F2 qui comprennent un pourcentage

Important de l'information. 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 des 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.

L'analyse réalisée sur l'ensemble des paramètres mesurés à différentes profondeurs montre un plan factoriel (Fig.3-38.) dont l'inertie totale est de 49.33% (27.44% pour le premier axe, 21.90 % pour le deuxième). Sur ce plan sont représentés simultanément les points correspondant aux individus et les vecteurs correspondant aux variables. Deux groupes de vecteurs rapprochés les uns des autres peuvent être observés. Ils sont associés respectivement aux variables suivantes :

- ϕ , 20 et 80 μm .
- C_g , C_t , C , I_p W_l .

Le rapprochement des vecteurs ou leur opposition montrent des relations marquées entre les paramètres, correspondant à des corrélations positives dans le cas de deux vecteurs proches l'un de l'autre et à des corrélations négatives en cas de vecteurs opposés.

Dans les deux groupes ainsi définis, on retrouve des paramètres présentant des relations bien connues, comme par exemple, pour les vecteurs proches, I_p et W_l avec la relation :

$$W_l - W_p = I_p$$

On remarque également que le vecteur représentatif de γ_d est pratiquement opposé à celui de W , sachant que :

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

Pour d'autres paramètres, la relation paraît tout simplement logique: ainsi, l'indice de compression C_c matérialise la capacité du sol à être comprimé, et qui augmente avec l'indice des vides e_0 , dont dépend la teneur en eau w en sens inverse du poids volumique.

L'interprétation de la position des vecteurs représentant les variables dans les plans factoriels permet de mettre en évidence des relations entre les caractéristiques géotechniques. Ce qui est bien visible dans la matrice de corrélation (Fig.4-37).

Variables	Yd(t/m3)	w%	sr%	Yh(t/m3)	5mm	2mm	0,08mm	20µm	2µm	wl(%)	IP	pc(bar)	ct	cg	c(bar)	φ(°)
Yd(t/m3)	1															
w%	-0.942	1														
sr%	0.036	0.159	1													
Yh(t/m3)	0.048	-0.040	0.016	1												
5mm	0.339	-0.378	-0.189	-0.060	1											
2mm	0.330	-0.370	-0.189	-0.060	1.000	1										
0,08mm	-0.352	0.337	-0.045	0.027	0.069	0.074	1									
20µm	0.184	-0.240	-0.200	-0.063	0.910	0.913	0.144	1								
2µm	0.217	-0.275	-0.201	-0.065	0.967	0.970	0.152	0.935	1							
wl(%)	-0.313	0.328	-0.011	-0.054	0.017	0.022	0.966	0.080	0.084	1						
IP	-0.345	0.348	-0.012	-0.046	-0.033	-0.030	0.915	0.043	0.043	0.941	1					
pc(bar)	0.088	0.012	0.214	0.071	0.105	0.104	-0.055	0.145	0.116	-0.050	-0.051	1				
Ct	-0.177	0.292	0.226	-0.002	-0.109	-0.107	0.142	-0.029	-0.054	0.155	0.137	0.805	1			
Cg	-0.195	0.289	0.217	-0.014	-0.148	-0.146	0.175	-0.091	-0.095	0.195	0.179	0.744	0.935	1		
c(bar)	-0.082	0.070	-0.068	0.399	-0.059	-0.062	0.098	-0.025	-0.073	0.071	0.119	0.008	-0.024	0.024	1	
φ(°)	-0.185	0.118	-0.154	0.051	0.211	0.213	0.043	0.281	0.219	-0.001	0.051	-0.057	-0.134	-0.162	0.596	1

Fig .3-38 : Matrice de corrélation

Les valeurs en gras sont différentes de 0 à un niveau de signification alpha=0,95

Yd(t/m3) : le poids volumique sec ; w% :la teneur en eau ; Sr% :degré de saturation ; Yh(t/m3) : le poids volumique humide ; [5mm_2mm_0.08_20µm_2µm] :granulométrie ; wl(%) :la teneur en eau ; IP : indice de plasticité ; pc(bar) : contrainte de prés consolidation ; Ct : coefficient de compressibilité Cg : coefficient de gonflement; c (bar) :la cohésion ; φ(°) : angle de frottement

NB : En gras, valeurs significatives au seuil alpha=0,050 (test bilatéral), coefficient de corrélation R=0,

➤ **Interprétation :**

Cette matrice appelée matrice de corrélation, représente le coefficient de corrélation entre les paramètres géotechniques, c'est-à-dire, le degré de liaison entre les paramètres géotechniques pris deux à deux. Il peut exister deux(2) types de corrélation entre deux(2) paramètres géotechnique.

1°) Corrélation positive : C'est quand le coefficient de corrélation entre deux paramètres est un nombre positif. Cette valeur indique que les deux paramètres évoluent dans le même sens, l'augmentation d'un paramètre entraîne l'augmentation de l'autre, de même sorte que la diminution d'un paramètre entraîne aussi la diminution de l'autre.

Exemple : la teneur en eau (w%) présente une corrélation positive avec paramètres suivants :

Sr(cc=0.036), Graulometrie0.08 (cc=0.337) , WI(cc=0.328) , Ip(cc=0.348) , Pc(cc=0.012) , Ct(cc=0.292), Cg(cc=0.289) , C(cc=0.070) , ϕ (cc=0.118)

2°) Corrélation négative : C'est quand le coefficient de corrélation entre deux paramètres est un nombre négatif. Cette valeur indique que les deux paramètres évolution dans le sens inverse, l'augmentation d'un paramètre entraîne la diminution.

Exemple : le poids volumique sèche (γ_d) présente une corrélation négative avec les paramètres suivants :

W(cc =-0.942) , Granulométrie 0.08mm(cc =-0.352) , WI (cc = -0.313), Ip (cc=-0.345), Ct (cc=-0.177), Cg(cc= -0.195) , C (cc=-0.082), ϕ (cc=-0.185) .

3°) corrélation nulle : Quand le coefficient de corrélation entre deux paramètres est égale à zéro, ça veut dire qu'ils ne sont pas corrélés, autrement dit , la variation d'un paramètre n'a pas aucune influence sur l'autre.

NB : un coefficient de corrélation supérieure 0.5 indique forte une liaison forte et un coefficient de corrélation compris entre 0.3 et 0.5 indique une liaison moyenne .cependant les valeurs des coefficients de corrélation inférieure à 0.3 indique une liaison faible.

C.C >0.5 – Forte liaison

0.3 < C.C < 0.5 -Moyenne liaison

C.C < 0.3 - Faible liaison

Un coefficient de corrélation égale à 1, indique que les paramètres sont équivalents

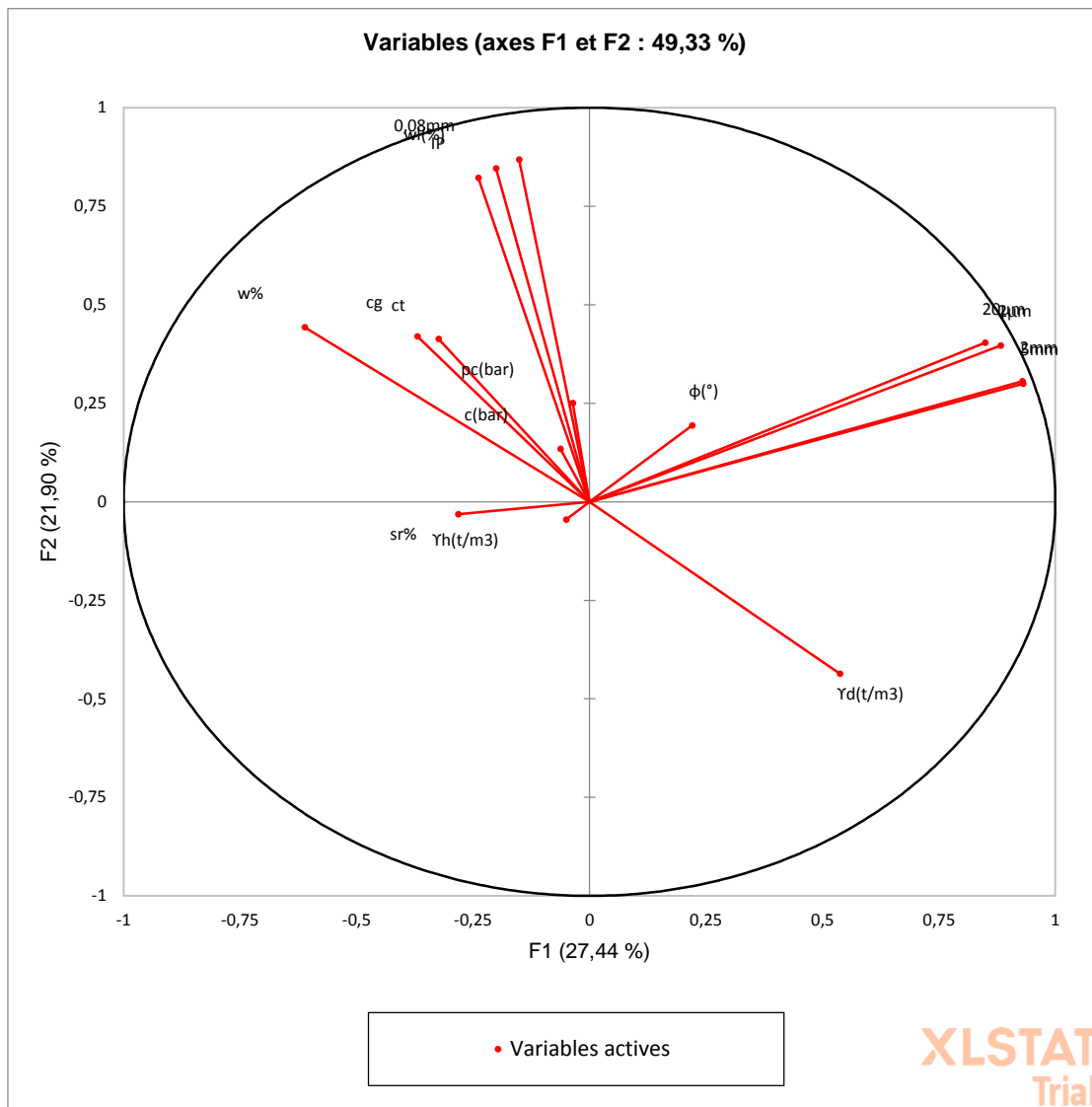


Fig.3-38 : Représentation des variables sur le cercle de corrélation

3-6 /Conclusion :

Les informations tirées de l'analyse en composantes principales doivent tenir compte des connaissances en mécanique des sols dans la manière de s'intéresser à certains paramètres.

4-1/Introduction

La distribution dans l'espace des valeurs des propriétés physiques et mécanique des sols est une donnée extrêmement importante la connaissance de la paramètres aussi latéralement que verticalement

4-2 / L'essai au pénétromètre dynamique

Le pénétromètre dynamique est un moyen simple, rapide et économique d'investigation des sols in situ. Il permet :

- d'apprécier de façon qualitative la résistance des terrains traversés, et de prévoir la réaction du sol à l'enfoncement de pieux.
- de déterminer l'épaisseur et la profondeur des différentes couches de sol.
- d'effectuer des contrôles de compactage
- d'estimer une caractéristique de portance, la « résistance dynamique de pointe » pour les essais PDA, dans le cas du sol cohérent.

L'essai consiste à enfoncer dans le sol par battage, un train de tiges de faible diamètre muni à son extrémité d'une pointe, et on mesure le nombre de coups N nécessaires pour obtenir un enfoncement donné.

4 -3/Présentations des données collectés

Les données traitées dans ce chapitre proviennent de sondages effectués avec un pénétromètre dynamique dans le cadre de projets de construction. Ces essais ont été effectués par le laboratoire national d'habitat et de construction. Nous disposons d'un grand nombre de courbes pénétrométriques sur lesquelles sont représentées simultanément la résistance de pointe opposée par le sol à l'enfoncement de la pointe conique du pénétromètre et la force de frottement du sol sur la paroi latérale de la tête de mesure. Etant donné l'importance du nombre de sondages, nous nous limiterons à:

- 25 sondages du plateau ouest de Ouled Fayet
- 59 sondages du plateau Est de Ouled Fayet
- 30 sondages du plateau Semrouni
- 50 sondages du plateau Roukhi

10 courbes pénétrométriques de chaque site ont été présentées dans les figures(4-1 ,4-2 ,4-3 ,4-4)

Pour chaque courbe pénétrométrique, nous avons relevé les valeurs de la résistance de pointe R_p , la profondeur (Z) et les coordonnées géographiques de l'essai. Les données ont été ensuite organisées dans un tableau EXCEL, donnant R_p en fonction de la profondeur (Voir Annexe).

4-4/Etude des sondages pénétrométriques en fonction de la profondeur

L'objectif de cette étude est de tester cette méthode pour la détermination des contrastes dans les dépôts marneux, sachant que les terrains étudiés sont constitués principalement par formations marneuses du Plais ancien, qui est souvent altérée en surface.

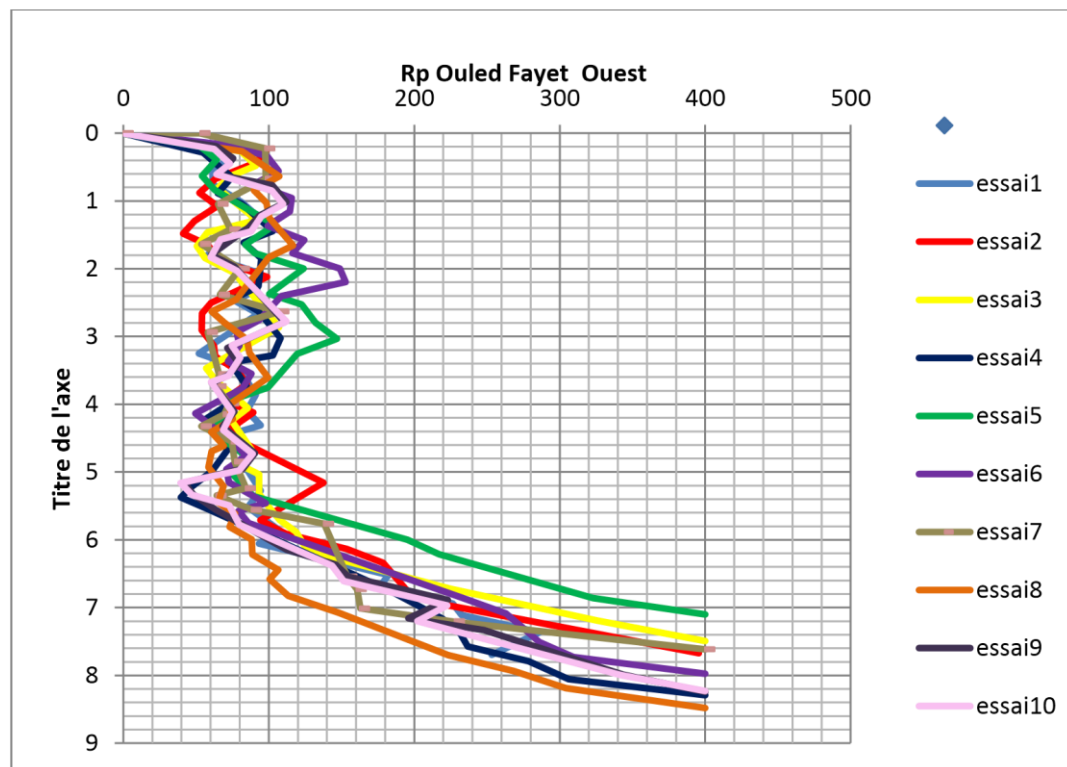


Fig4.1 : variation de la résistance dynamique (rd) en fonction de la profondeur (z) pour Ouled Fayet ouest

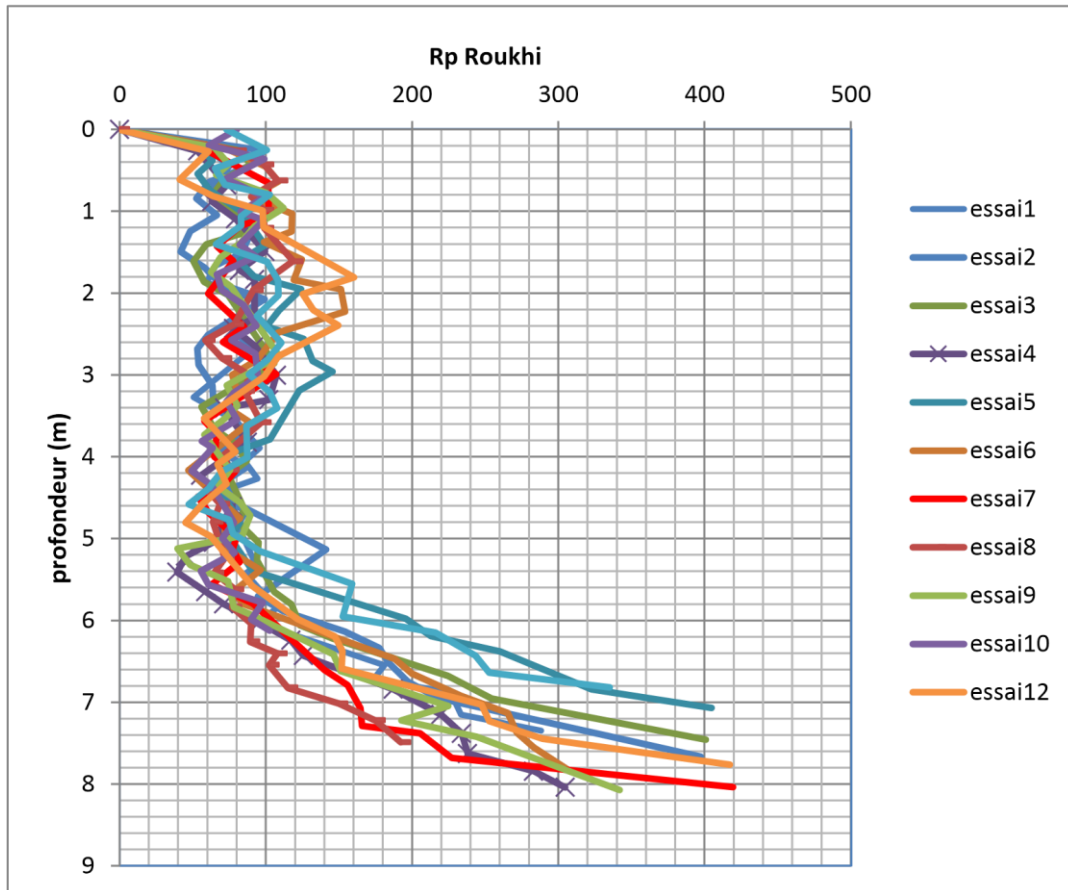


Fig4.2 : variation de la résistance dynamique (r_d) en fonction de la profondeur (z) pour Roukhi

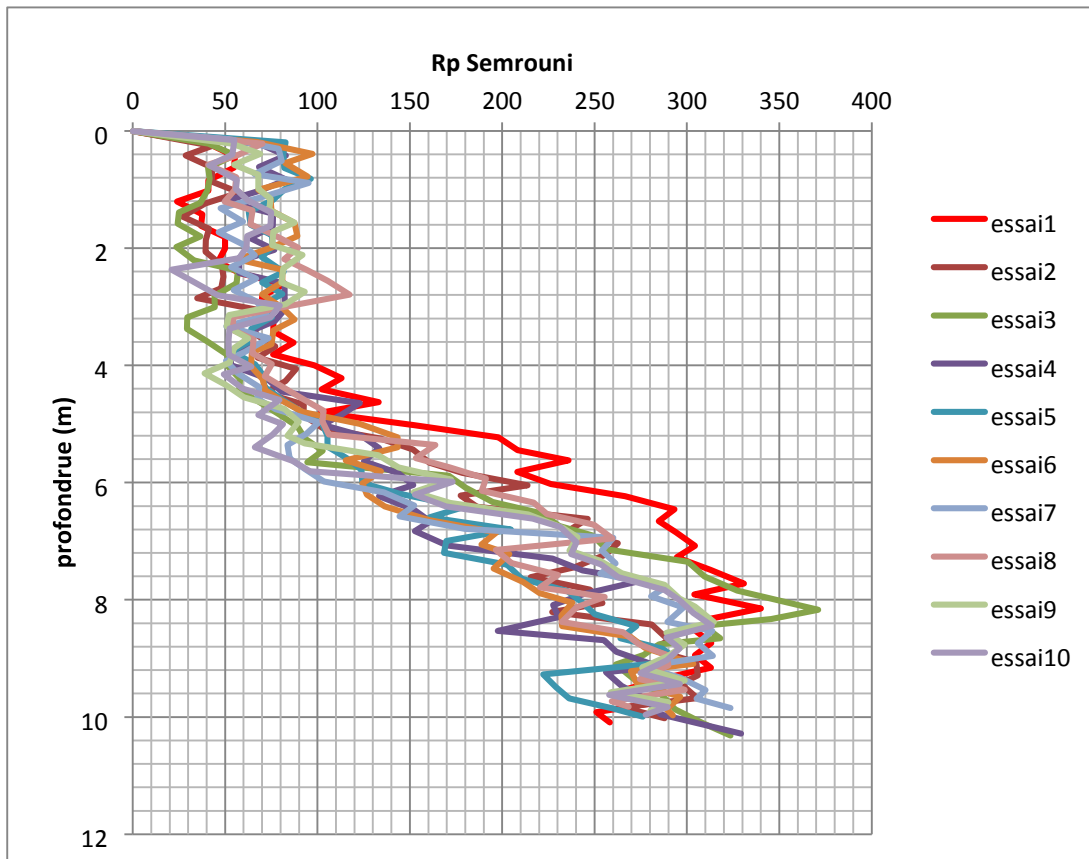


Fig4.3 : variation de la résistance dynamique (rd) en fonction de la profondeur (z) pour Semrouni

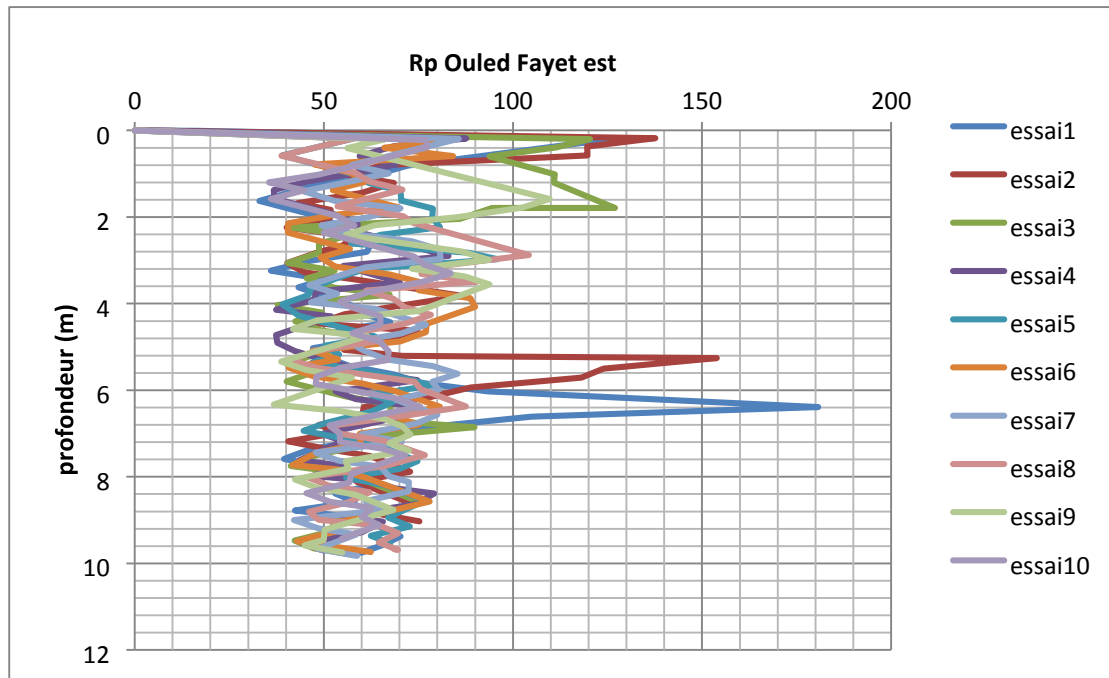


Fig4.4 : variation de la résistance dynamique (rd) en fonction de la profondeur (z) pour Ouled Fayet Est

La technique d'analyse en composantes principales a été utilisée pour analyser les résultats des essais pénétrométriques dans des plans horizontaux choisis à différentes Profondeurs.

L'analyse a mis en évidence deux groupes d'individus proches les uns des autres : les familles ainsi constituées définissent deux couches (figure.4-5 ;4-6 ;4-7 ;4-8 ;). cette analyse combinées aux résultats de celle obtenus par les paramètres physiques et mécaniques ainsi que la lithologie observée dans les sondages, nous a permis de définir deux zones différents qui sont présentées dans ce qui suit

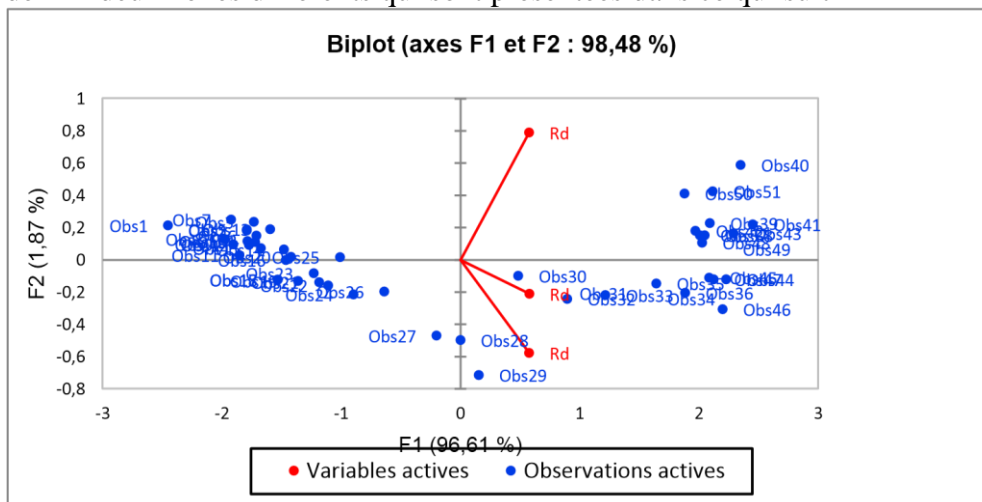


Fig4.5 : Graphique des résistent dynamique deux couche pour Ouled Fayet Est

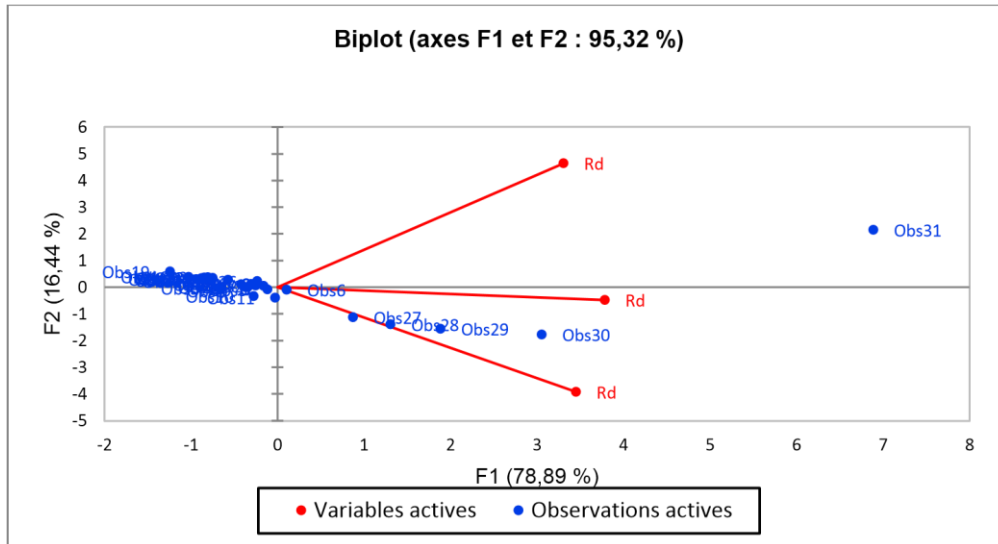


Fig4.6 : Graphique des résistent dynamique deux couche pour Ouled Fayet ouest

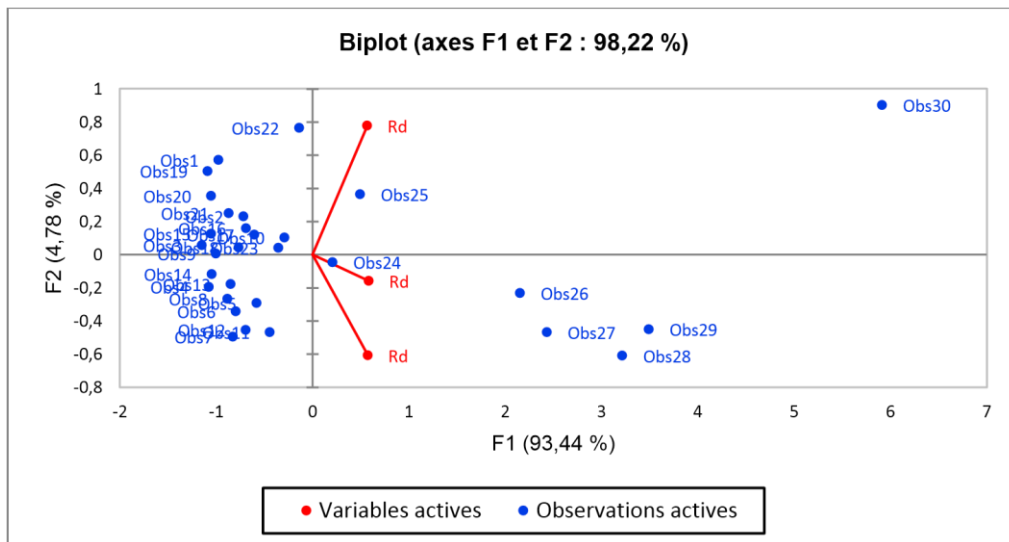
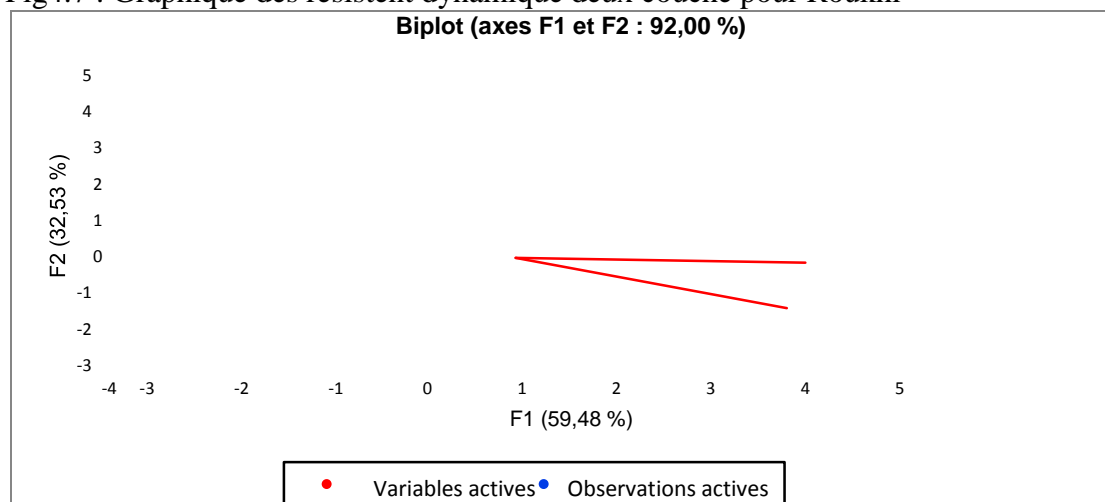


Fig4.7 : Graphique des résistent dynamique deux couche pour Roukhi



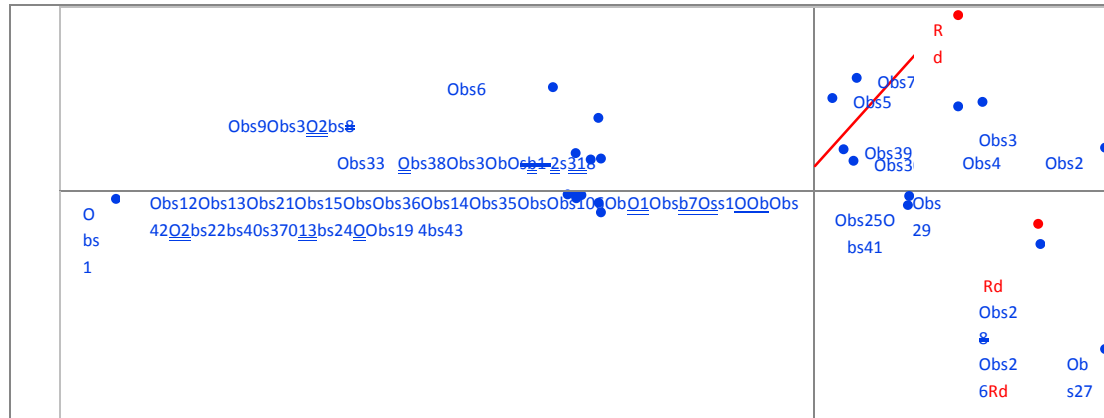


Fig4.8 : Graphique des résistances dynamiques à deux couches pour Semrouni

4-5/Présentation graphique des sondages pénétrométriques en fonction de la profondeur

a) Méthodologie

Pour cette étude dans des plans horizontaux, nous devons trier les données et découper le tableau suivant la profondeur. La résistance dynamique R_d , étant en général le paramètre le plus préjudiciable pour l'étude des sols compressibles, nous allons nous intéresser à son évolution avec la profondeur.

L'objectif de cette étude des plans horizontaux est donc d'établir des cartes de courbes isométriques de la résistance dynamique à différentes profondeurs (2m 6m 10 m).

Les courbes isométriques de résistance de point sont faites par le logiciel SURFER. Ce dernier effectue des modèles numériques de terrain en établissant des grilles contenant les coordonnées cartésiennes (X, Y, Z) qui définissent l'espace à étudier.

Dans le cas échéant les données sont issues des valeurs pénétrométriques (résistance dynamique) effectués dans les sites (Ouled Fayet Est, Ouled Fayet Ouset, Roukhi, Semrouni)

Lors de cette étude pour la réalisation des courbes, nous avons pour chaque profondeur (Z) fixe on introduit la résistance dynamique associée à chaque position de sondage définie par X et Y.

Donc on effectue une grille composée de trois colonnes, dont la première et la deuxième contiennent les coordonnées de chaque sondage et la troisième colonne contient la résistance dynamique affectée à chaque profondeur (2m 6m 10m)

Les figures suivantes représentent les cartes des courbes isométriques de la résistance dynamique aux profondeurs 2m 6m 10m.

b) Résultats et discussion.

Les courbes d'iso-valeurs sont représentées dans les figures (4-9 ; 4-10 ; 4-11) l'analyse de ces courbes nous permet de tirer les conclusions suivantes:

Dans la carte de 06 m de profondeur, on constate la présence de faibles valeurs R_d (25 bars). ce qui nous permet de penser à un probable problème d'instabilité et risque de glissement. Cela nécessite d'approfondir les investigations dans ce sens. Ce résultat est en parfait accord avec l'investigation géotechnique qui montre de faibles caractéristiques géotechnique à cette profondeur.

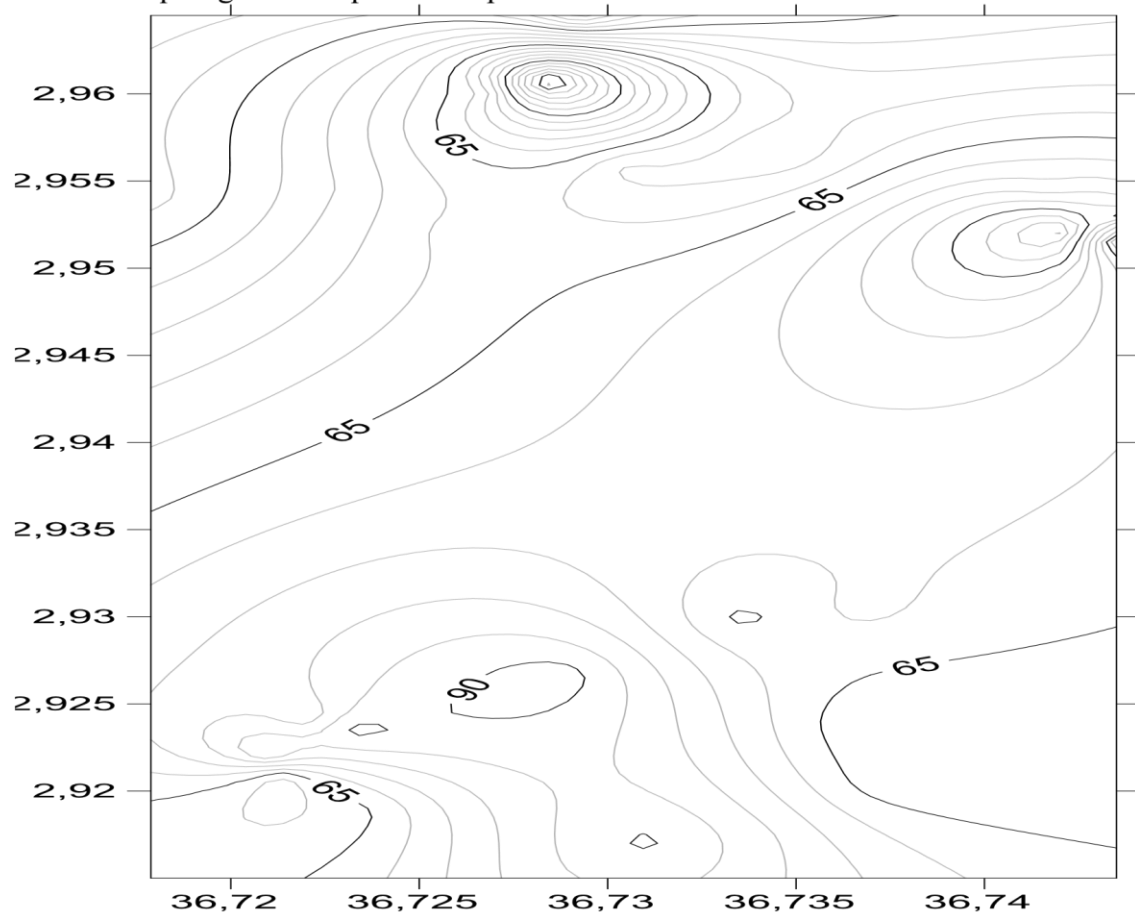


Fig. 4.9 Carte de courbes isométriques de R_d à $z=2$ m

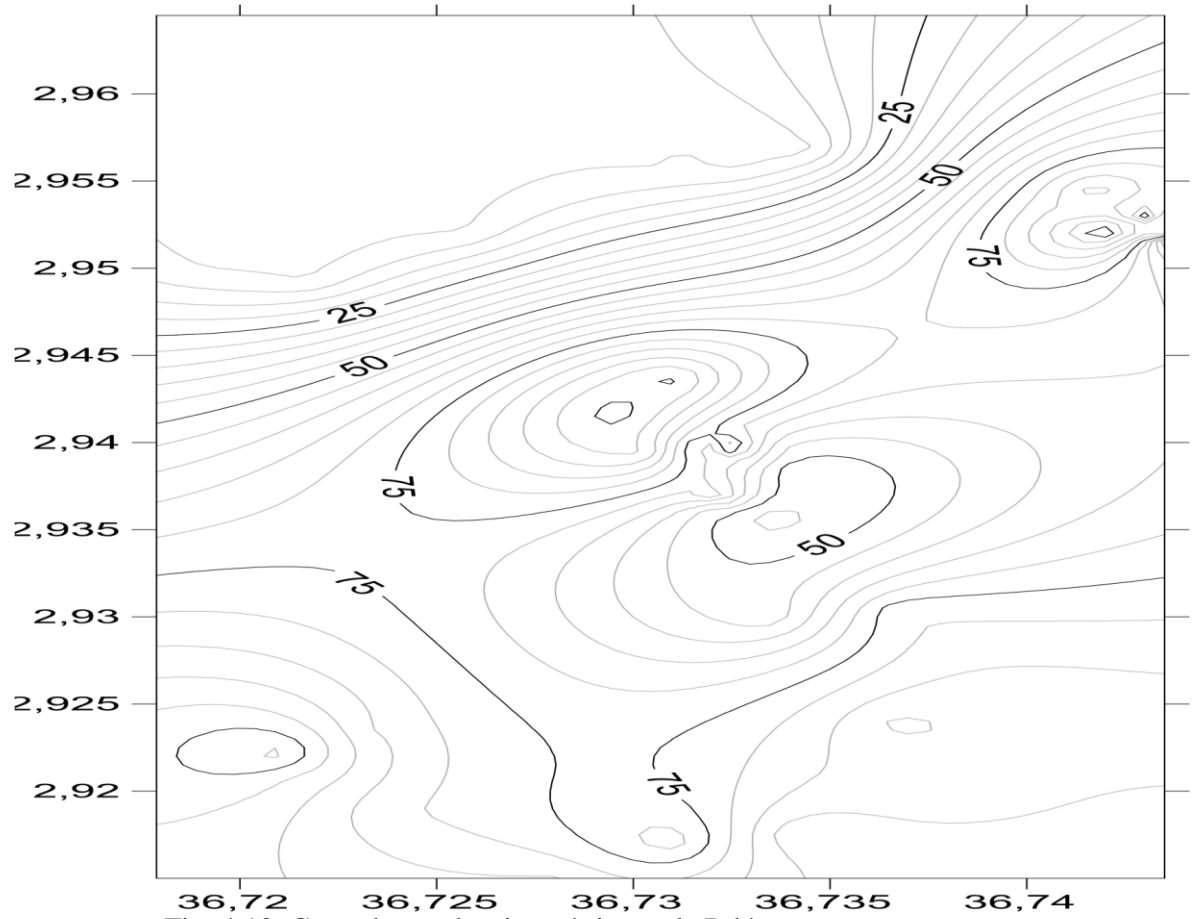


Fig. 4.10 Carte de courbes isométriques de Rd à z=6 m

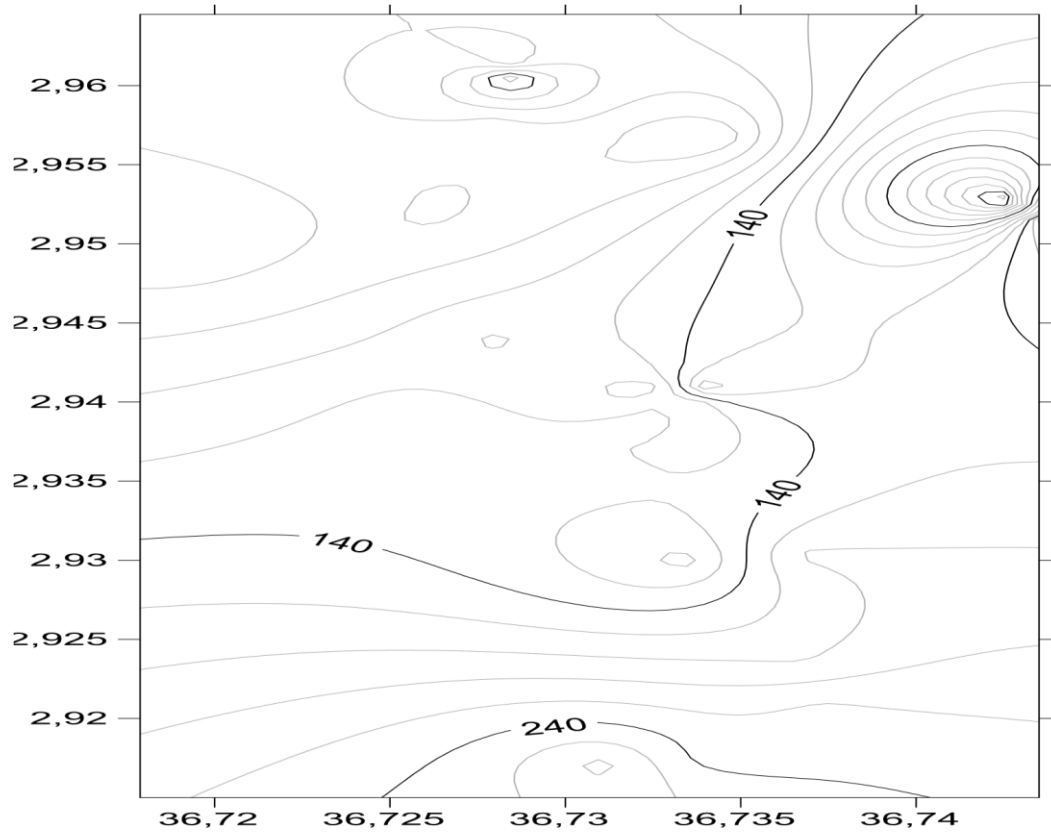


Fig. 4-11 Carte de courbes isométriques de Rd à z=10 m

4-6/Conclusion

En exploitant la grande quantité de sondages, nous avons pu montrer intérêt de l'ACP appliquée à des données géotechniques : la représentation issue de l'ACP met en évidence les classes d'individus et facilite ainsi l'établissement de cartes de courbes isométriques.

CONCLUSION GENERALE

Cette étude a été faite sur le site de Sud-Ouest de la région d'Alger (Ouled Fayet) dont le but est d'analyser et d'interpréter les paramètres géotechniques des marnes plaisancienne ; les résultats obtenus à partir de l'ensemble des données mis à notre disposition par l'organisme (laboratoire de l'habitat et de la construction –LNHC-Oued

Smar) où la principale conclusion qui dégagent de leurs analyse se résumant comme suit :

- L'étude géologique de notre zone d'étude (Ouled Fayet) a relevé et confirmé l'appartenance des terrains aux marnes du plaisancien avec une structure lithologique déposées de la surface vers la profondeur suivent l'ordre suivant :

marnes altérées ; marnes intermédiaires ; marnes saines.
- les méthodes statistiques constituent un instrument raisonnable pour déterminer les valeurs caractéristiques à partir des résultats d'essais sur le terrain et en laboratoire.

La statistique descriptive est une méthode d'analyse statistique en mécanique des sols.
- L'analyse statistique descriptive comporte l'étude des variables quantitatives et qualitatives et l'étude des variables quantitatives se fait avec l'aide des indicateurs de position de dispersion et de forme.
- Dans les méthodes d'étude des relations entre les paramètres, il existe des méthodes statistiques multi-variables. Parmi ces méthodes, les plus utilisés dans l'étude des propriétés physique et mécanique des sols l'analyse de régression multiple et l'analyse factorielle.

- L'analyse factorielle présente plusieurs types de méthodes et parmi ces méthodes on trouve l'analyse en composantes principale (ACP) qu'il s'agit d'une méthode factorielle qui permet de construire des facteurs considérés comme nouvelles variables indépendantes ou non corrélés sur le plan statistique , ce qui permet de faciliter l'étude des relation entre les variables initiales .
- L'interprétation des représentations factorielles prend en compte plusieurs critères et ne se limite pas systématiquement à une simple description du nuage de points en

ACP

Recommandation

A partir de ces résultats on peut dire que le terrain du Ouled Fayet présente des risques de glissement et qu'il faut prendre des mesures pratiques pour éviter l'occurrence de ces instabilités

- 1) Abdul Baki, A. ; Magnan, J.P., Pouget, P., 1993. « Analyse probabiliste de la stabilité de deux remblais sur versant instable », *Laboratoire centrale des ponts et chaussées, Paris*

- 2) Aymé, A. (1956). "Contribution à l'étude de la plaine de la Mitidja occidentale et de sa bordure atlasique." Bull. Serv. Carte Géol.(8).

- 3) Costet, J., et al. (1969). Cours pratique de mécanique des sols, Dunod.

- 4) DUBY, C., 2006. « Analyse en Composantes principale », note de cours, paris: Institut National Agronomique Paris – Grignon

- 5) Haroon, S. A., et al. (1993). "An in vitro test for temperature sensitivity and resistance to *Meloidogyne incognita* in tomato." *Journal of Nematology* **25**(1): 83.

- 6) Immediato, H., 2010. « Cours statistiques », note de cours : Lyon: Université Claude Bernard de Lyon.

- 7) Liang, L., et al. (2002). "Highly enantioselective 1, 4-addition of diorganozinc reagents to cyclic enones using chiral diphosphite ligands derived from H8-binaphthol." *Organic letters* **4**(22): 3799-3801.

- 8) Lumb, P. (1966). "The variability of natural soils." *Canadian Geotechnical Journal* **3**(2): 74-97.

- 9) Magnan, J. and S. Baghery (1982). "Statistiques et probabilités en mécanique des sols Etat des connaissances, Rapport de Recherche du LCPC, vol. 109." Paris, France: Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (in French).

- 10) Magnan, J.-P. (1996). "Les applications des statistiques et probabilités en géotechnique au LCPC." *Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées*(202): 25-35.

- 11) Magnan, J.-P. (2000). "Quelques spécificités du problème des incertitudes en géotechnique." *Revue française de géotechnique*(93): 3-9.

12) Magnan, J-P., 1980. « Essai de mécanique des sols en laboratoire et en place ». Article, Paris: Laboratoire central des ponts et chaussées.

13) Megnounif Iméne-2013

14) Monbet, V. (2009). "Tests statistiques." Notes de cours.

15) Pierre Legendre, 2007. « Les lois de distribution » , note de cours, Montréal: Université de Montréal

16) Pohl, C. (2011). "Determination of characteristic soil values by statistical methods." ISGR Geotechnical Safety and Risk: 427-434.

17) Statistical Analysis of geotechnical engineering properties of Hong Kong marine clays" 2nd International Conference on New Developments in Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 28-30 May 2009, Near East University, Nicosia, North Cyprus

18) Wu, M., et al. (1996). "Comprehensive Rutherford backscattering and channeling study of ion-beam-synthesized ErSi_{1.7} layers." Journal of applied physics **79**(9): 6920-6925.