

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

Université ABOU-BEKR BELKAID-TLEMCEM-



Faculté de Technologie

Département de Génie Civil

Mémoire pour l'obtention du diplôme de :

Master en Génie Civil

Option: Géotechnique

Présenté par :

M^{lle} BENCHERIF Ibtissem Rym

M^r HADJILA Abderrahim

Thème

Traitement statistique des données
géotechniques

Soutenu devant le jury composé de :

M ^r CHEKROUN.A	MCA	Univ.Tlemcen	Président
M ^r ZADJAOUA	Pr	Univ.Tlemcen	Examineur
M ^{me} BENAHCILIF.S	MCB	Univ.Tlemcen	Encadrant
M ^{lle} AYAD.F	MCB	Univ.Tlemcen	Co-Encadrant

Année universitaire:2020/2021

Remerciements

Nous tenons d'abord à remercier le bon Dieu tout puissant qui nous aidé à mener à bien ce travail, ainsi que nos profonds remerciements s'adressent à nos chères encadrantes M^{me} BENAHCILIF et M^{lle} Ayad d'être disponible pour nous et de nous avoir aidé.

Nous tenons à remercier également M^r CHEKROUN de présider le jury ainsi que M^r ZADJAOUI d'avoir accepté d'examiner ce modeste travail et d'apporter les critiques nécessaires.

Enfin nous exprimons notre profonde gratitude à tous ceux qui nous ont aidé et ont contribué dans notre formation.

Dédicaces

Je tiens tout d'abord à dédier ce modeste travail à mes parents pour leur dévouement en espérant d'être à la hauteur de leurs attentes.

A mes trois chères sœurs pour leur aptitude à me redonner confiance en moi.

A ma meilleur amie et sœur Nabahat pour son écoute.

A tous mes collègues et amies en particulier Latifa et Ilham.

A mon binôme HADJILA Abderrahim.

BENCHERIF Ibtissem Rym

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à mes chers parents, que Dieu les garde et les protège.

A mes chers frères et sœur.

A mes très chers grands parents.

*A toute la promotion de génie civil master 2 option géotechnique
2020-2021.*

A ma collègue BENCHERIF Ibtissem Rym.

HADJILA Abderrahim

Résumé

Le sol est le support de tout ouvrage, cependant celui-ci est de nature hétérogène et variable. La variabilité des paramètres du sol est due aux multiples phénomènes qui occurred depuis l'existence de la terre.

Actuellement, le choix des valeurs des caractéristiques géotechniques est relativement subjectif. Il n'en est plus ainsi si l'on soumet les résultats des mesures à une analyse statistique. Ce travail présente quelques méthodes statistiques simples qui conduisent à une évaluation qui prend en compte la dispersion des mesures. Mais ces méthodes permettent également de connaître l'hétérogénéité d'un site, par exemple avec le procédé de l'analyse des variances.

Nous nous proposons également d'illustrer ce qui a été formulé en appliquant ces outils statistiques sur un nombre importants de sondages situés dans la région d'Alger afin de déduire l'importance de la statistique pour le traitement des données géotechniques.

Mots clés : variabilité, dispersion, moyenne, écart-type, corrélations, homogénéité.

ملخص

التربة هي اساس أي بنية، ولكنها غير متجانسة ومتغيرة في الطبيعة. ويعود تباين خصائص التربة إلى الظواهر المتعددة التي تحدث منذ وجود الأرض.

وفي الوقت الحالي، فإن اختيار قيم الخصائص الجيوتقنية هو أمر ذاتي نسبياً. ولم يعد الأمر كذلك إذا كانت نتائج القياسات خاضعة للتحليل الإحصائي. يقدم هذا العمل بعض الطرائق الإحصائية البسيطة التي تؤدي إلى التقييم الذي يأخذ في الاعتبار تشتت القياسات. ولكن هذه الأساليب تجعل من الممكن أيضاً تقييم عدم تجانس الموقع، على سبيل المثال مع عملية تحليل التباينات.

ونقترح أيضاً توضيح ما تم صياغته من خلال تطبيق هذه الأدوات الإحصائية على عدد من الدراسات الاستقصائية من أجل استنتاج أهمية الإحصاءات في معالجة البيانات الجيوتقنية.

الكلمات المفتاحية : التباين ، التشتت، المتوسط، الانحراف المعياري، علاقات الارتباط، تجانس

Abstract

The soil is the support of any structure; however it is heterogeneous and variable in nature. The variability of soil parameters is due to the multiple phenomena that occur since the existence of the earth.

Currently, the choice of geotechnical characteristics values is relatively subjective. This is no longer the case if the results of the measurements are subjected to statistical analysis. This work presents some simple statistical methods which lead to an evaluation which takes into consideration the dispersion of the measurements. But these methods also make it possible to know the heterogeneity of a site, for example with the process of the analysis of variances.

We also propose to illustrate what has been formulated by applying these statistical tools on a number of surveys in order to infer the importance of statistics for the processing of geotechnical data.

Keywords: variability, dispersion, mean, standard deviation, correlations, homogeneity.

Sommaire

INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE 1 : RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LES STATISTIQUES	4
1. INTRODUCTION :	4
2. NOTIONS SUR LES STATISTIQUES :	4
2.1. Types de statistiques :	4
2.2. Différence entre les probabilités et les statistiques :	4
3. BASES DES STATISTIQUES DESCRIPTIVES :	5
3.1 Vocabulaire des statistiques :	5
3.2 Organisation des données statistiques:	7
3.3 La représentation graphique :	8
3.4 Caractéristiques numériques d'une série quantitative :	11
3.4.1 Caractéristiques de position :	11
3.4.2 Caractéristiques de dispersion :	13
3.5 Liaison entre variables :	15
3.5.1 Deux variables quantitatives :	15
3.5.2 Deux variables qualitatives :	17
3.6 Liaison multidimensionnelle :	18
3.6.1 Matrice des covariances et de corrélations :	18
3.6.2 Tableau de nuage :	18
4. CONCLUSION :	19
CHAPITRE 2 : APPLICATION DES STATISTIQUES EN GEOTECHNIQUE.....	21
1. INTRODUCTION :	21
2. LES DIFFERENTS PARAMETRES CARACTERISANT UN SOL :	21
3. EFFETS DE LA VARIATION DES PROPRIETES DU SOL SUR SON COMPORTEMENT : [HOUMADI 2011]	22
4. STATISTIQUES EN GEOTECHNIQUE :	23
4.1. Variabilité et incertitude dans les données géotechniques :	24
4.2. Modèles d'incertitude géotechnique :	24
4.3. Analyse statistique de second moment :	25
4.3.1. Analyse statistique de second moment des variables aléatoires indépendantes :	26
4.3.2. Analyse statistique de second moment des variables dépendantes :	27
4.4. La géostatistique :	29
4.5. La dépendance statistique et la stationnarité :	30
4.6. Loi de distribution des propriétés du sol :	31
5. EXEMPLES D'APPLICATION DES STATISTIQUES EN GEOTECHNIQUE:.....	32
5.1 Exemple de tassements au cours du temps du remblai B de Cubzac-les-Ponts :	34
5.2 Evaluation des risques de liquéfaction par la méthode statistique :	35
6. CONCLUSION :	36
CHAPITRE 3 TRAITEMENT PRATIQUE STATISTIQUE DES DONNEES GEOTECHNIQUES(SITE D'ALGER)	38
1. INTRODUCTION	38
2. ORIGINE ET ANALYSE DES SONDRAGES:.....	ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.
2.1. DEFINITION DE LA METHODE DE PRELEVEMENT	ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.
2.2. RESULTATS ET CALCULS.....	39
2.3 INTERPRETATION DES RESULTATS	44
3.CONCLUSION	46
CONCLUSION GENERALE.....	48
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	50
ANNEXES.....	54

Liste des figures

Figure 1.1: Représentation par diagramme en bâtons.....	09
Figure 1.2: Représentation par diagramme en secteur.....	09
Figure 1.3: Histogramme d'une série statistique continue descriptive. [Dalalyan 2011]	10
Figure 1.4: Histogramme d'une série statistique discrète descriptive. [Dalalyan 2011]	11
Figure 1.5: Détermination du mode d'une série statistique.....	11
Figure 1.6: Description de la régression linéaire [Polisano 2018].....	15
Figure 1.7: Exemple de nuage de points d'un graphe représentant l'espérance de vie des femmes en fonction du taux de natalité [Dalalyan 2011].....	16
Figure 2.1: Décomposition des données de résistance au cisaillement non drainés des essais CAUC dans un sol homogène d'argiles marine. Le graphe (a) : tendance linéaire. Le graphe (b) : résidus de dégradation. (Uzielli 2008).	28
Figure 2.2: Régression linéaire généralisée carrée de la résistance au cisaillement non drainée calculée à partir des tests CPT et profil de conception subjectif [Lacasse et al. 2007].	29
Figure 2.3: Exemples de coefficient de corrélation entre deux variables. (Uzielli 2008).....	31
Figure 2.4: Degrés de consolidation à 1100 jours, tassement final et tassement à 1100 jours résultat d'un calcul probabiliste [Bagheri et Magnan 1983].	35
Figure 3.1: Localisation du site étudié.....	38
Figure 3.2: Localisation des implantations des sondages du site étudié.....	39
Figure 3.3: Histogrammes des paramètres.....	43

Liste des tableaux

Tableau 1.1 : Tableau des modalités et fréquences.....	09
Tableau 1.1: Table de contingence. [Dalalyan 2011]	17
Tableau 2.1: Paramètres des sols utilisés dans les corrélations (Boutonnier 2007)	22
Tableau 2.2: Statistiques d'échantillons au second moment des sols de Szeged (Rétháti 1988).....	27
Tableau 2.3: Teste de normalité pour les propriétés d'un sol de Hong-Kong (LUMB 1966).....	32
Tableau 2.4: Valeurs des coefficients de variation des paramètres de la résistance et la contrainte cyclique. (Ayad 2014).....	37
Tableau 3.1: Résultats de l'analyse statistique pour un sol argileux.	41
Tableau 3.2: Matrice de corrélation des paramètres.	42

Notations

n_i : Effectif

f_i : Fréquence

M_0 : Mode

M_e : Médiane

m : Moyenne

V_x : Variance

S_x ou σ_x : Ecart-type

cov : Covariance

$corr$: Corrélation

ρ_d : Masse volumique sèche (t/m^3)

w : Teneur en eau (%)

Sr : Degré de saturation (%)

ρ_s : Masse volumique des grains solides (t/m^3)

Fc : Pourcentage de fines (%)

W_l : Limite de liquidité (%)

I_p : Indice de plasticité

I_c : Indice de consistance

σ'_p : Contrainte de préconsolidation (bar)

Cc : Indice de compression

Cg : Indice de gonflement

C_{uu} : Cohésion non consolidée non drainée (bar)

φ_{uu} : Angle de frottement non consolidé non drainé ($^\circ$)

C_{cu} : Cohésion consolidée non drainée (bar)

φ_{cu} : Angle de frottement consolidé non drainé ($^\circ$)

C_{cd} : Cohésion consolidée drainée (bar)

φ_{cu} : Angle de frottement consolidé drainé ($^\circ$)

Introduction générale

Introduction générale

Lors d'un projet d'aménagement, tout constructeur doit (de manière à assurer la pérennité des futurs ouvrages) prendre en compte la nature des formations constituant le sous-sol du site où il est prévu de réaliser cet aménagement. Cette prise en compte permet d'adapter le projet au site envisagé, de définir le système de fondation de l'ouvrage avec le meilleur rapport sécurité/coût et de se garantir contre les effets de la réalisation des travaux sur les constructions voisines.

Pour mener à bien cette mission, l'intervention du géotechnicien se divise généralement en deux phases :

- ❖ Une phase d'investigations réalisée sur le site étudié et permettant d'obtenir des informations relatives aux formations constituant le sous-sol (homogénéité ou hétérogénéité du sous-sol, détermination des caractéristiques géo-mécaniques des formations constituant le sous-sol, présence de circulations d'eaux souterraines...). Différents moyens peuvent être utilisés pour obtenir ces informations : reconnaissance géologique visuelle, réalisation d'essais mécaniques en place (sondage par forage destructif avec ou sans réalisation d'essais pressiométrique, sondage par forage carotté, sondage au pénétromètre, etc..), essais en laboratoire géotechnique sur des matériaux prélevés sur site...
- ❖ Une phase d'ingénierie permettant d'analyser les résultats des investigations, de les synthétiser pour ne garder que les paramètres représentatifs et importants, de modéliser à l'aide de ces paramètres le comportement du futur aménagement sur le site d'implantation envisagé et d'étudier la faisabilité de solutions techniques permettant l'adaptation spécifique d'un aménagement à son site.

La mécanique des sols classique repose sur des hypothèses simplificatrices qui ignorent les caractéristiques des sols ; le sol est généralement défini par l'hétérogénéité, la diversité la variabilité dans l'espace et l'inconnue.

Le concept de la variabilité est la clé des ouvrages des méthodes statistiques et probabilistes, suivant le degré d'intégration et de modélisation de la variabilité des paramètres.

Les méthodes de calculs sont divisées en trois grandes familles :

- ❖ Méthodes déterministes : basées sur l'expérience de l'ingénieur, ces méthodes prennent en compte les incertitudes par l'intermédiaire de coefficients de sécurité empiriques.
- ❖ Méthodes statistiques : s'appliquent sur des ouvrages pour les lesquels les reconnaissances donnent des mesures suffisantes au point de vue statistique. La dispersion des paramètres du sol peut être prise en compte dans les calculs par l'intermédiaire de l'écart-type et la variance.
- ❖ Méthodes probabilistes : l'approche probabiliste permet d'intégrer de manière quantitative les incertitudes sur l'estimation des paramètres de calcul.

En effet chaque paramètre dans le sol est en réalité une variable aléatoire dans l'espace et le temps et dont cette variabilité peut affecter le sol et son comportement. C'est dans cette idée que nous allons aborder l'approche statistique pour le traitement des données et montrer les relations entre les paramètres pour chaque type de sol.

Et pour cela nous avons structuré notre travail en trois chapitres comme suit :

- ✓ Le chapitre 1 est consacré à un rappel bibliographique sur les notions fondamentales de bases sur les statistiques, et les méthodes de calculs.
- ✓ Le chapitre 2 est consacré à l'introduction des statistiques en géotechniques, avec quelques exemples de l'utilisation de celles-ci pour différents cas d'étude du sol.
- ✓ Le chapitre 3 est une partie pratique de ce qui a été dit ou on présente une étude statistique pour différents sondages de sol à Alger.

Chapitre 1 :
Recherche bibliographique sur les statistiques

Chapitre 1 : Recherche bibliographique sur les statistiques**1. Introduction :**

Le mot statistique désigne à la fois un ensemble de données d'observations et l'activité qui consiste dans leur recueil, leur traitement et leur interprétation.

Nous nous proposons dans ce chapitre de faire un rappel bibliographique sur les notions de base des statistiques, les fonctions usuelles fréquemment utilisées ainsi que les types de graphes qui illustrent une série.

2. Notions sur les statistiques :**2.1. Types de statistiques :**

Il existe deux types de statistiques :

✚ La statistique descriptive :

Elle a pour but de résumer l'information contenue dans les données de façon synthétique et efficace par :

- Représentations graphiques.
- Indicateurs de position, de dispersion et de relation.
- Régression linéaire.

Elle permet de dégager les caractéristiques essentielles du phénomène étudié et de suggérer des hypothèses pour une étude ultérieure plus poussée. Les probabilités n'ont ici qu'un rôle mineur.

✚ La statistique inférentielle :

Elle a pour but de faire des prévisions et de prendre des décisions au vu des observations par :

- Estimation paramétrique.
- Intervalles de confiance, tests d'hypothèse.
- Nécessite de définir des modèles probabilistes du phénomène aléatoire et savoir gérer les risques d'erreurs.

2.2. Différence entre les probabilités et les statistiques :

La statistique repose sur l'observation de phénomènes concrets et utilise les probabilités comme outils d'analyse et de généralisation.

La théorie des probabilités permet de modéliser efficacement certains phénomènes

aléatoires et d'en faire l'étude théorique.

Le calcul des probabilités propose des modèles simplificateurs du comportement d'un phénomène.

Les données observées sont souvent imprécises. Le modèle probabiliste permet de représenter comme des variables aléatoires les déviations entre « vraies » valeurs et valeurs observées.

La répartition statistique d'une variable au sein de la population est souvent voisine de modèles mathématiques proposés par le calcul des probabilités.

Le calcul des probabilités fournit des théorèmes si le processus d'échantillonnage équiprobable des individus parmi la population est respecté.

Les statistiques ont connu un grand essor avec l'arrivage des ordinateurs performants.

3. Bases des statistiques descriptives :

Les statistiques sont un ensemble de méthodes permettant de décrire et d'analyser des observations (ou données). Ces observations consistent généralement en la mesure d'une ou plusieurs caractéristiques communes sur un ensemble de personnes ou d'objets équivalents.[Polisano,2018]

L'objectif des outils de statistique descriptive élémentaire est de fournir, si possible graphiquement, des résumés synthétiques de séries de valeurs, adaptées à leur type (qualitatives ou quantitatives), et observées sur une population ou un échantillon.

3.1. Vocabulaire des statistiques :

a) La population :

Ensemble d'unités statistiques de même nature sur lequel on recherche des informations quantifiables.

Population = univers de référence lors de l'étude d'un problème statistique donné.

Exemples :

- personnes d'un pays (unité statistique = personne)
- ensemble des arbres d'une forêt (unité statistique = arbre)
- ensemble de la production d'une usine (unité statistique = produit)
- ensemble des prix d'articles de consommation (unité statistique = prix)

b) Un échantillon :

Sous-ensemble d'une population sur lequel on effectue une étude statistique.

Son étude vise généralement à tirer des conclusions relatives à la population dont il est issu.

Exemples :

- Fraction de la population d'un pays (1000 personnes / 60 millions)
- Prélèvement d'eau (éprouvette) dans un bassin

c) Une variable :

Caractéristique mesurable à laquelle on peut attribuer plusieurs valeurs différentes.

+ Variable quantitative :

Une variable quantitative prend des valeurs entières ou réelles, elle est dite alors discrète ou continue.

- Modalités = valeurs numériques
- Continue (peut prendre toutes les valeurs d'un intervalle) : poids, revenu, longueur, âge, temps, etc.
- Discontinue ou discrète : (ne peut prendre que des valeurs isolées) : nombre d'enfants dans une famille, classe d'âges, etc.

Cette propriété ayant des incidences sur la nature de sa distribution et donc sur les graphiques associés. Nous nous intéresserons surtout aux variables continues.

+ Variable qualitative :

Caractéristiques non numériques dans le sens où les opérations de base n'ont pas de sens. Peuvent être nominales $\Omega = \{\text{Homme, Femme}\}$ ou ordinales lorsque l'ensemble des catégories est muni d'un ordre total (très résistant, assez résistant, peu résistant,..). Les différents niveaux d'une variable qualitative s'appellent des modalités (ou catégories).

- Modalités = grandeurs non quantifiables.
- Dichotomique : valeurs binaires (vrai/faux, oui/non, H/F, etc.).
- Catégorielle : les modalités sont des catégories (couleurs, sexe, etc.).
- Nominale : rouge, orange, vert...
- Ordinale : faible, moyen, fort.

Lorsque la variable peut être exprimée numériquement, elle est dite quantitative (ou mesurable). Dans ce cas, elle peut être discontinue ou continue.

→ Elle est discontinue si elle ne prend que des valeurs isolées les unes des autres. Une

variable discontinue qui ne prend que des valeurs entières est dite discrète (exemple : nombre d'enfants d'une famille).

→ Elle est dite continue lorsqu'elle peut prendre toutes les valeurs d'un intervalle fini ou infini (exemple : diamètre de pièces, salaires...).

d) Les séries statistiques:

La série d'observations recueillies s'appelle série statistique. Elle est généralement retranscrite dans un tableau de données.

3.2. Organisation des données statistiques:

On regroupe toutes les données de la série statistique dans un tableau indiquant la répartition des individus selon le caractère étudié. Le regroupement s'effectue par classes :

- Si le caractère est qualitatif ou discontinu, une classe contient tous les individus ayant la même modalité ou la même valeur du caractère.
- Si le caractère est continu, une classe est un intervalle.
 - Pour construire ces intervalles, on respecte les règles suivantes :
 - Le nombre de classes est compris entre 5 et 20 (de préférence entre 6 et 12)
 - Chaque fois que cela est possible, les amplitudes des classes sont égales.
 - Chaque classe (sauf la dernière) contient sa borne inférieure mais pas sa borne supérieure.
 - Dans les calculs, une classe sera représentée par son centre, qui est le milieu de l'intervalle.
 - Une fois la classe constituée, on considère les individus répartis uniformément entre les deux bornes (ce qui entraîne une perte d'informations par rapport aux données brutes).
- Ce qu'il faut calculer pour chaque classe :

a) L'effectif :

C'est le nombre d'individus de la classe : on le note n_i (i est l'indice de la classe).

b) La fréquence :

C'est la proportion d'individus de la population ou de l'échantillon appartenant à la classe : on la note f_i .

f_i et n_i sont liés par la relation suivante :

$$f_i = \frac{n_i}{N} \dots (1.1)$$

Avec :

N : nombre total des individus dans la population.

Remarque : on peut remplacer f_i par $f_i * 100$ qui représente alors un pourcentage.

On a toujours : $\sum_{i=1}^k n_i = N$ et $0 \leq f_i \leq 1$ et $\sum_{i=1}^k f_i = 1$

Où k est le nombre de classes.

c) La fréquence cumulée :

La fréquence de la classe augmentée de celles des classes précédentes (lorsque la variable statistique est quantitative). La fréquence cumulée est une fonction F de la borne supérieure de la classe (dans le cas d'une variable statistique continue).

✓ Exemple :

Un processus industriel de fabrication ne fournit jamais des caractéristiques parfaitement constantes.

L'analyse statistique a pour but d'étudier cette variabilité en tenir compte pour prévoir de façon probabiliste le comportement d'individus non observés, chercher à l'expliquer à l'aide de variables extérieures, chercher à l'augmenter dans le but de distinguer les individus entre eux.

n : La taille de l'échantillon

k : Le nombre de modalités.

m_i $i \in [1, k]$: les modalités

n_i : Le nombre d'occurrence (l'effectif) de m_i dans l'échantillon

f_i : La fréquence correspondante.

On a $\sum n_i = n$; $f_i = \frac{n_i}{n}$; $\sum f_i = 1$

3.3. La représentation graphique :

Ils servent à visualiser la répartition des individus.

➤ Pour une variable statistique qualitative :

On utilise des diagrammes à secteurs circulaires, des diagrammes en tuyaux d'orgue, des diagrammes en bandes. Le principe est de représenter des aires proportionnelles aux fréquences de la variable statistique.

➤ Pour une variable statistique discrète :

On utilise un diagramme différentiel en bâtons, complété du diagramme des fréquences cumulées appelé diagramme cumulatif. Le diagramme cumulatif est la représentation

graphique d'une fonction F, appelée fonction de répartition de la variable statistique.

Les diagrammes représentant une série discrète sont :

❖ **Diagrammes en bâtons:** à chaque modalité correspond un rectangle vertical dont la hauteur est proportionnelle à la fréquence relative de la modalité.

Exemple :

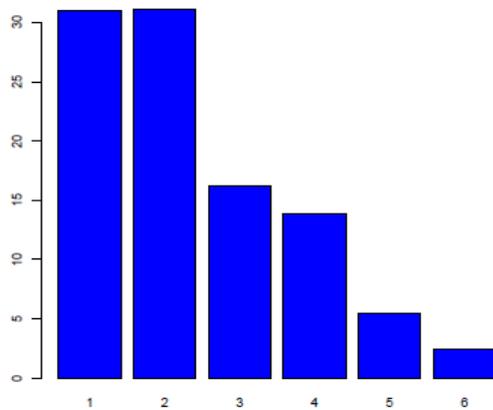


Figure 1.1 : Représentation par diagramme en bâtons

Tableau 1.1 : Modalités et des fréquences (Polisano, 2018)

Modalité (nombre de personnes)	(m_i)	Fréquence (f_i en %)
1		31.0
2		31.1
3		16.2
4		13.8
5		5.5
6 et plus		2.4

❖ **Diagrammes sectoriels:** à chaque modalité correspond un secteur de disque dont l'aire est proportionnelle à la fréquence relative de la modalité.

Exemple :

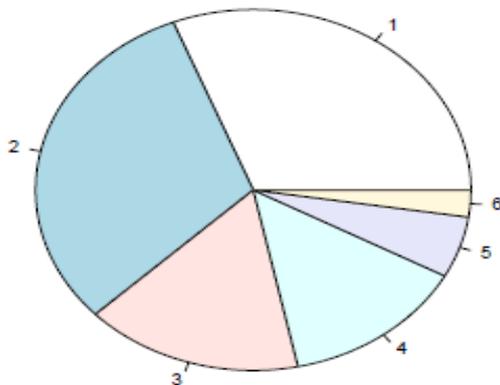


Figure 1.2 : Représentation par diagramme en secteur (Polisano, 2018)

Modalité (nombre de personnes)	(m_i)	Fréquence (f_i en %)
1		31.0
2		31.1
3		16.2
4		13.8
5		5.5
6 et plus		2.4

➤ Pour une variable statistique continue :

Quand la variable étudiée est continue, les représentations du type diagramme en bâtons sont sans intérêt, car les données de x sont en général toutes distinctes, donc les **effectifs** tous égaux à 1.

Le diagramme représentant la série est :

❖ **L'histogramme** : ce sont des rectangles juxtaposés dont chacune des bases est égale à l'intervalle de chaque classe et dont la hauteur est telle que l'aire de chaque rectangle soit proportionnelle aux effectifs (histogramme des effectifs) ou aux fréquences de la classe correspondante (histogramme des fréquences).

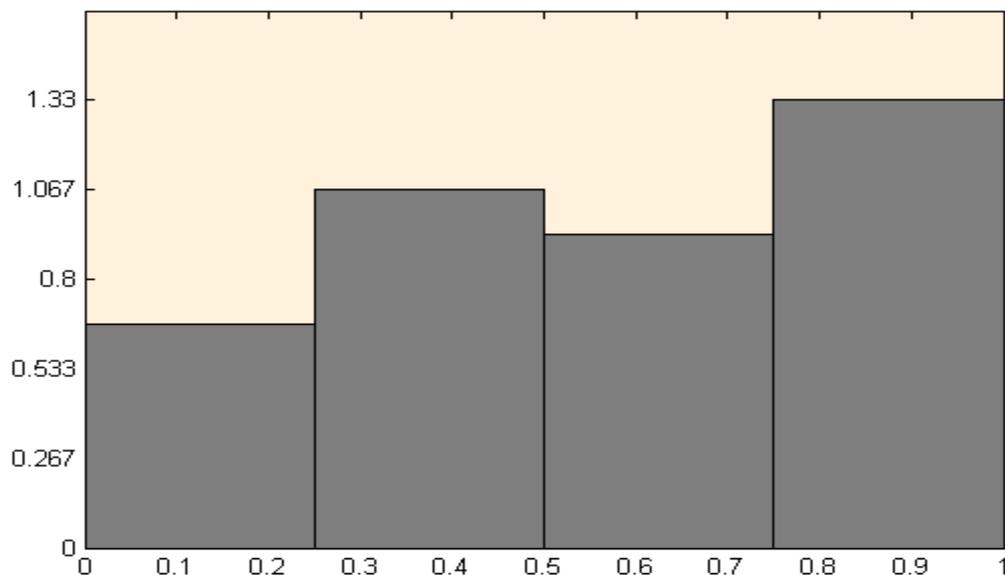


Figure 1.3 : Histogramme d'une série statistique continue descriptive.

[Dalalyan, 2011]

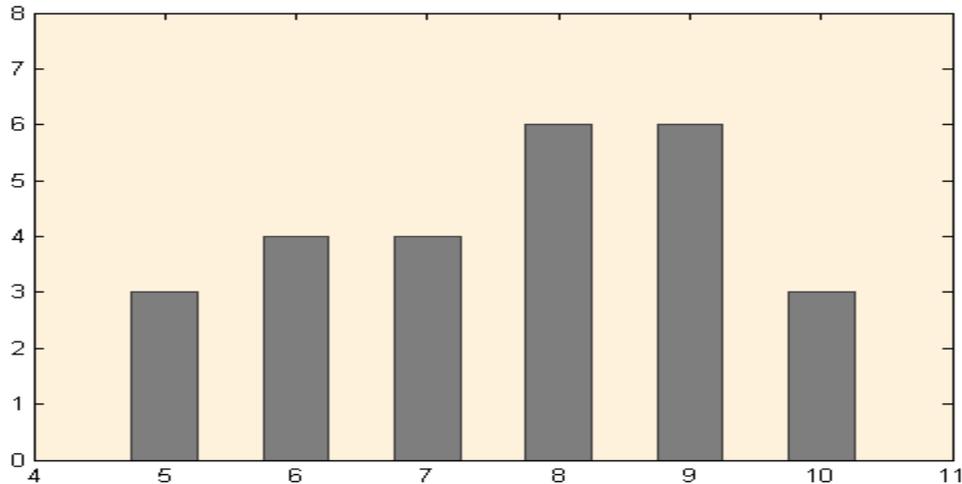


Figure 1.4: histogramme d'une série statistique discrète descriptive.

[Dalalyan, 2011]

On obtient le polygone des effectifs (ou des fréquences) en reliant les milieux des bases supérieures des rectangles.

Le mode est déterminé comme le montre la « figure 1.5 » :

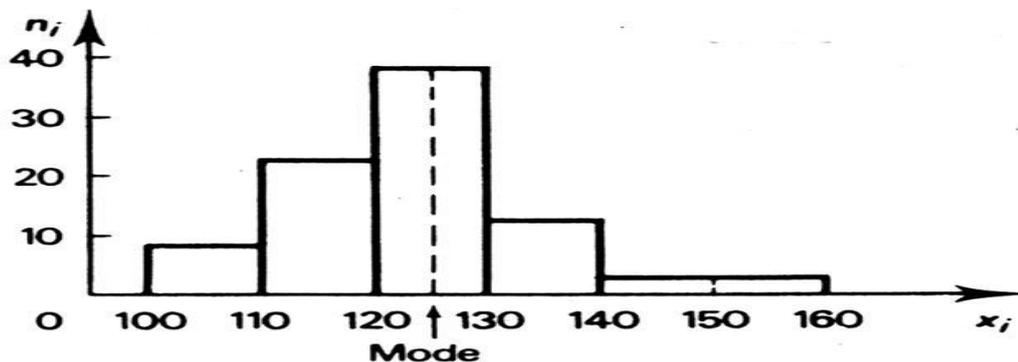


Figure 1.5: Détermination du mode d'une série statistique.

La courbe cumulative (ou polygone des fréquences cumulées) est obtenue en portant les points dont les abscisses représentent la borne supérieure de chaque classe et les ordonnées les fréquences cumulées correspondantes, puis en reliant ces points par des segments de droite. Son équivalent dans la théorie probabiliste est la fonction de répartition.

3.4. Caractéristiques numériques d'une série quantitative :

3.4.1. Caractéristiques de position :

a. Le mode :

Le mode, désigné par M_o est la valeur de la variable statistique la plus fréquente.

Dans le cas d'une variable statistique continue, on parle plutôt de classe modale.

NB : Le mode ou la classe modale n'est pas obligatoirement unique.

b. La médiane :

La médiane, désignée par Me , est la valeur de la variable telle qu'il y ait autant d'observations, en dessous d'elle qu'au-dessus ou, ce qui revient au même, la valeur correspondant à 50% des observations.

Comment la déterminer?

- Si la variable est discrète :

On désigne par n le nombre d'observations.

- Si n est impair : Me est la $(\frac{n+1}{2})$ ème observation.
- Si n est pair : $n = 2k$. Me est la moyenne arithmétique des deux observations centrales.

$$Me = \frac{k^{\text{ème}} \text{ observation} + (k + 1)^{\text{ème}} \text{ observation}}{2} \dots (1.2)$$

- Si la variable est continue :

Me vérifie $F(Me) = 0.5$ où F est la fonction de répartition de la variable. On détermine alors un intervalle médian (intervalle contenant la médiane), puis on procède à l'intérieur de cette classe à une interpolation linéaire.

c. La moyenne :

Lorsque x désigne la variable statistique, la valeur moyenne, ou moyenne de la série se note m ou \bar{x} . Elle est l'analogue d'un centre de gravité.

- **1er cas** : si les observations ne sont pas groupées (la série est dite non classée).

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_j \dots (1.3)$$

n : Effectif total.

x_j : $j^{\text{ème}}$ Valeur de la variable.

- **2ème cas** : si les observations sont groupées (la série est dite classée)

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^k n_i x_i = \sum_{i=1}^k f_i x_i \dots (1.4)$$

x_i : Centre de la classe i

n_i : Effectif de la classe i

f_i : Fréquence de la classe i

n : Effectif total

On effectue en fait ici une moyenne arithmétique pondérée.

Dans le cas d'une variable continue, cette moyenne pondérée n'est qu'une valeur approchée de la vraie valeur moyenne de la série car on remplace chaque x_j par le centre de la classe à laquelle il appartient.

La moyenne arithmétique est choisie parmi d'autres types de moyenne (géométrique, harmonique...) car elle possède une propriété extrêmement intéressante:

Lorsqu'on se livre à des observations scientifiques, les mesures ne sont pas toujours exactement identiques d'une fois sur l'autre, même lorsque les conditions semblent être similaires. Il se produit ce que l'on appelle une erreur d'observation. On a la relation suivante :

$$\text{Valeur observée} = \text{valeur exacte} + \text{erreur d'observation}$$

Avec :

x_i : Valeur observée.

x_e : Valeur exacte.

$x_i - x_e$: Erreur d'observation.

On décide alors de prendre pour x_e la valeur qui minimise les erreurs d'observation, en fait la moyenne des carrés de ces erreurs (critère des moindres carrés). Le calcul prouve que la meilleure valeur estimant x_e suivant ce critère est \bar{x} .

La moyenne \bar{x} des valeurs observées d'une grandeur x correspond à la meilleure estimation de x_e .

Cela ne signifie pas que \bar{x} soit la valeur exacte x_e de la grandeur observée mais que c'est la meilleure évaluation possible que l'on puisse en faire selon le critère des moindres carrés.

3.4.2. Caractéristiques de dispersion :

a) L'étendue :

L'étendue, notée e , représente la différence entre les valeurs extrêmes de la distribution

$$e = x_n - x_1 \dots (1.5)$$

b) L'intervalle interquartile :

L'intervalle interquartile, noté I , est la différence entre les deux quartiles Q_3 et Q_1

$$I = Q_3 - Q_1 \dots (1.6)$$

Cet intervalle contient 50% de la population en éliminant 25% à chaque extrémité. Cette caractéristique est nettement meilleure que l'étendue.

c) La variance :

C'est la caractéristique de dispersion la plus utilisée avec l'écart quadratique moyen.

1^{er} cas : série non classée :

$$V_x = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (x_j - \bar{x})^2 \dots (1.7)$$

2^{ème} cas : série classée :

$$V_x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^k n_i (x_i - \bar{x})^2 = \sum_{i=1}^k f_i (x_i - \bar{x})^2 \dots (1.8)$$

Dans le cas d'une variable statistique continue, x_i représente le centre de la $i^{\text{ème}}$ classe.

d) Ecart quadratique moyen :

Par définition, l'écart quadratique moyen d'une série statistique est la racine carrée de la variance. On note s_x

A la différence de la variance qui correspond à un carré, l'écart quadratique moyen est homogène à la variable statistique et s'exprime dans les mêmes unités. Il permet de mesurer la dispersion de la distribution statistique autour de sa valeur moyenne.

e) La régression linéaire :

Le but est de trouver la droite la plus proche d'un nuage de points tel que représenté sur la « figure 1.6 »

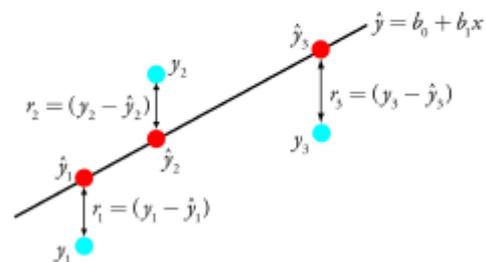
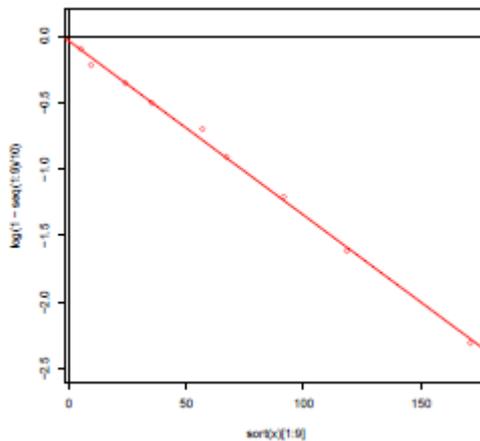


Figure 1.6: Description de la régression linéaire

L'idée consiste à estimer y_i par $\hat{y}_i = \beta_1 x_i + \beta_0$ en choisissant β_1 et β_0 qui minimise l'erreur quadratique moyenne

f) Corrélation :

Deux événements (appelons les X et Y) sont corrélés si l'on observe une dépendance, une relation entre les deux. Par exemple, le nombre de cheveux d'un homme a tendance à diminuer avec l'âge : âge et nombre de cheveux sont donc corrélés.

✚ Corrélation ou causalité ?

Une erreur de raisonnement courante consiste à dire : « X et Y sont corrélés, donc X cause Y ». On confond alors corrélation et causalité car en réalité, il se pourrait aussi que :

- Y cause X
- X et Y aient une cause commune Z
- X et Y soient accidentellement liés mais n'aient aucun lien de
- causalité.

3.5. Liaison entre variables :

Dans cette section, on s'intéresse à l'étude simultanée de deux variables X et Y. L'objectif essentiel des méthodes présentées est de mettre en évidence une éventuelle variation simultanée des deux variables, que nous appellerons alors liaison.

Dans certains cas, cette liaison peut être considérée a priori comme causale, une variable X expliquant l'autre Y ; dans d'autres, ce n'est pas le cas, et les deux variables jouent des rôles symétriques.

Dans la pratique, il conviendra de bien différencier les deux situations et une liaison n'entraîne pas nécessairement une causalité. Sont ainsi introduites les notions de covariance, coefficient de corrélation linéaire, régression linéaire, rapport de corrélation, indice de concentration, khi-deux et autres indicateurs qui lui sont liés.

3.5.1. Deux variables quantitatives :

✚ Nuage de points :

Il s'agit d'un graphique très commode pour représenter les observations simultanées de deux variables quantitatives. Il consiste à considérer deux axes perpendiculaires, l'axe horizontal représentant la variable X et l'axe vertical la variable Y, puis à représenter chaque individu observé par les coordonnées des valeurs observées.

L'ensemble de ces points donne en général une idée assez bonne de la variation conjointe des deux variables et est appelé nuage. On notera qu'on rencontre parfois la terminologie de diagramme de dispersion, traduction plus fidèle de l'anglais scatter-plot.

La figure ci-dessous représente un graphe en nuage de point pour un exemple de l'espérance de vie des femmes par rapport au taux de natalité.

Espérance de vie des femmes en fonction du taux de natalité

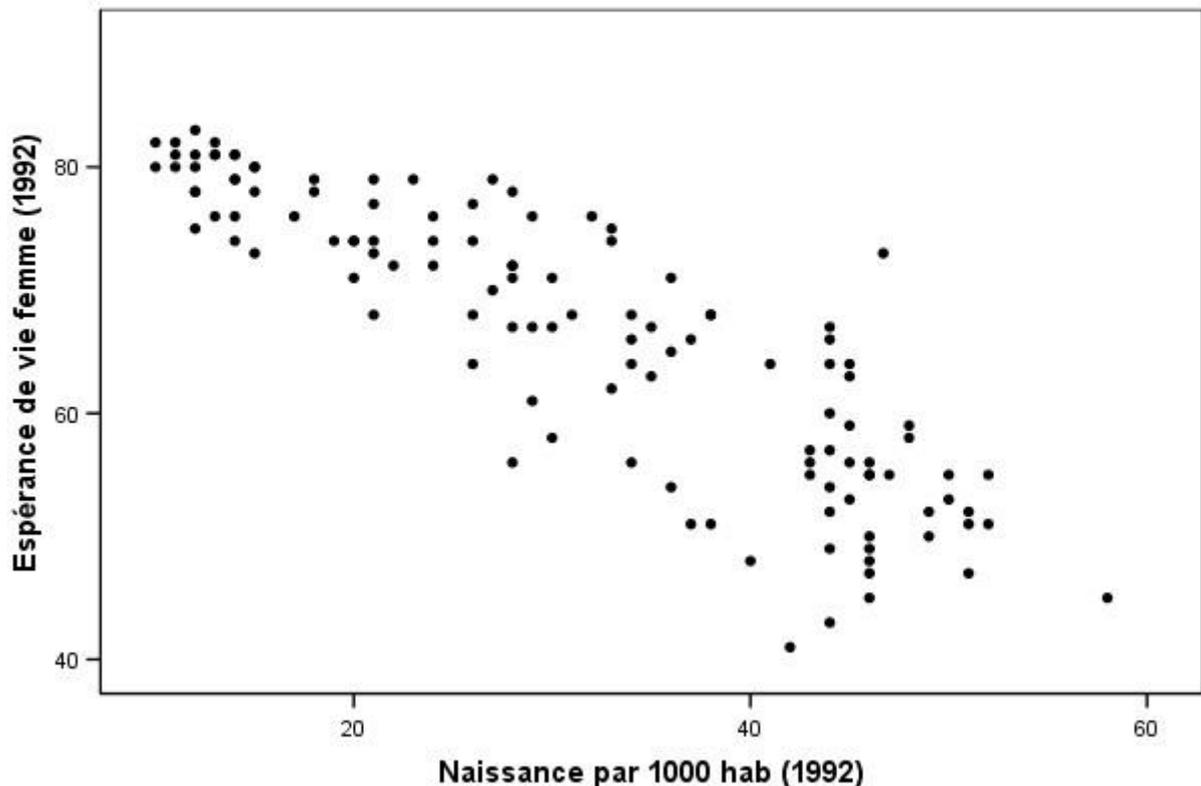


Figure 1.7: Exemple de nuage de points d'un graphe représentant l'espérance de vie des femmes en fonction du taux de natalité [Dalalyan, 2011]

Le choix des échelles à retenir pour réaliser un nuage de points peut s'avérer délicat. D'une façon générale, on distinguera le cas de variables homogènes (représentant la même grandeur et exprimées dans la même unité) de celui des variables hétérogènes.

✚ Indice de liaison :

Le coefficient de corrélation linéaire est un indice rendant compte numériquement de la manière dont les deux variables considérées varient simultanément. Il est défini à partir de la covariance qui généralise à deux variables la notion de variance :

$$cov(X, Y) = \sum_{i=1}^n w_i [x_i - \bar{x}] [y_i - \bar{y}] \dots (1.9)$$

La covariance est une forme bilinéaire symétrique qui peut prendre toute valeur réelle et dont la variance est la forme quadratique associée. Elle dépend des unités de mesure dans lesquelles sont exprimées les variables considérées ; en ce sens, ce n'est pas un indice de liaison "intrinsèque". C'est la raison pour laquelle on définit le coefficient de corrélation linéaire (parfois appelé coefficient de Pearson ou de Bravais Pearson), rapport entre la covariance et le produit des écarts-types :

$$corr(X, Y) = \frac{cov(X, Y)}{\sigma_X \sigma_Y} \dots (1.10)$$

Le coefficient de corrélation est égal à la covariance des variables centrées et réduites respectivement associées à X et Y : $corr(X, Y) = cov\left(\frac{X-\bar{x}}{\sigma_X}, \frac{Y-\bar{y}}{\sigma_Y}\right) \dots (1.11)$

Par conséquent, $corr(X, Y)$ est indépendant des unités de mesure de X et de Y. Le coefficient de corrélation est symétrique et prend ses valeurs entre -1 et +1.

3.5.2. Deux variables qualitatives :

On considère dans ce paragraphe deux variables qualitatives observées simultanément sur n individus. On suppose que la première, notée X, possède r modalités notées ; ... ; x₁ ; ... ; x_r, et que la seconde notée Y possède c modalités notées y₁ ; ... ; y_h ; ... ; y_c.

Ces données sont présentées dans un tableau à double entrée, appelé table de contingence, dans lequel on dispose les modalités de X en lignes et celles de Y en colonnes. Ce tableau est donc de dimension r * c et a pour élément générique le nombre n_{lh} d'observations conjointes des modalités x_l de X et y_h de Y ; les quantités n_{lh} sont appelées les effectifs conjoints.

Une table de contingence se présente donc sous la forme suivante :

Tableau 1.2: table de contingence.

	y ₁	...	y _h	...	y _c	sommes
x ₁	n ₁₁	...	n _{1h}	...	n _{1c}	n ₁₊
...
x _l	n _{l1}	...	n _{lh}	...	n _{lc}	n _{l+}
...
x _r	n _{r1}	...	n _{rh}	...	n _{rc}	n _{r+}
somme	n ₊₁	...	n _{+h}	...	n _{+c}	n

⇒ Représentation graphique :

On peut envisager, dans le cas de l'étude simultanée de deux variables qualitatives, d'adapter les graphiques présentes dans le cas unidimensionnel : on découpe chaque partie (colonne, partie de barre ou secteur) représentant une modalité de l'une des variables selon les effectifs des modalités de l'autre. Mais, de façon générale, il est plus approprié de réaliser des graphiques représentant des quantités très utiles.

3.6. Liaison multidimensionnelle :

Il est possible de débiter une exploration de données multidimensionnelles en adaptant simplement les méthodes déjà étudiées.

3.6.1. Matrice des covariances et de corrélations :

Lorsqu'on a observé simultanément plusieurs variables quantitatives (p variables, $p \geq 3$) sur le même échantillon, il est possible de calculer d'une part les variances de toutes ces variables, d'autre part les $\left(\frac{p(p-1)}{2}\right)$ covariances des variables prises deux à deux. L'ensemble de ces quantités peut alors être disposé dans une matrice carrée ($p * p$) et symétrique, comportant les variances sur la diagonale et les covariances à l'extérieur de la diagonale ; cette matrice, appelée matrice des variances-covariances (ou encore matrice des covariances) sera notée S .

Elle sera utilisée par la suite, mais n'a pas d'interprétation concrète. Notons qu'il est possible de vérifier que S est semi définie positive.

De la même manière, on peut construire la matrice symétrique ($p * p$) comportant des 1 sur toute la diagonale et, en dehors de la diagonale, les coefficients de corrélation linéaire entre les variables prises deux à deux.

Cette matrice est appelée matrice des corrélations, elle est également semi définie positive, et nous la noterons R . Elle est de lecture commode et indique quelle est la structure de corrélation des variables étudiées.

3.6.2. Tableau de nuage :

Notons X^1, \dots, X^p les p sont des variables quantitatives considérées ; on appelle tableau de nuages le graphique obtenu en juxtaposant, dans une sorte de matrice carrée $p * p$, p^2 sous-graphiques ; chacun des sous-graphiques diagonaux est relatif à l'une des p variables, et il peut s'agir, par exemple, d'un histogramme ; le sous-graphique figurant dans le bloc d'indice (j, j') $j \neq j'$ est le nuage de points réalisé avec la variable X^j en abscisses et la variable $X^{j'}$ en ordonnées.

Dans certains logiciels anglo-saxons, ces graphiques sont appelés SPLOM (ScatterPLOt

Matrix). Le tableau de nuages, avec la matrice des corrélations, fournit ainsi une vision globale des liaisons entre les variables étudiées.

4. Conclusion :

Ce chapitre nous a fait un rappel sur les notions fondamentales des statistiques, et nous avons pu déduire que les représentations graphiques des données statistiques permettent une analyse visuelle de la répartition des données et les indicateurs de localisation, de dispersion et de relation permettent de les quantifier et de résumer l'information.

On peut conclure de cela que les statistiques sont impérativement applicables dans tous domaines. Ainsi nous pourrions maintenant aborder l'introduction des statistiques en géotechnique.

Chapitre 2 :
Application des statistiques en géotechnique

Chapitre 2 : Application des statistiques en géotechnique**1. Introduction :**

L'investigation géotechnique repose en générale sur des techniques in-situ & laboratoire, ou l'ingénieur géotechnicien est confronté à des terrains hétérogènes. Cette hétérogénéité rend la mission plus ardue coûteuse et augmente l'erreur de caractérisation des sols. L'origine de la variabilité spatiale est le processus de sédimentation géologiques qui modifie continuellement les couches de sol.

C'est dans ce contexte que le recours aux statistiques et aux calculs de corrélations entre les différents paramètres des sols est devenu indispensable afin d'obtenir des résultats plus fiables et ainsi diminuer les aléas à long terme. Ce chapitre se penchera sur l'application des statistiques dans le domaine de la géotechnique.

2. Les différents paramètres caractérisant un sol :

Dans le domaine de la géotechnique plusieurs paramètres sont utilisés pour connaître les caractéristiques physiques mécaniques et chimiques ainsi que le comportement et la déformabilité du sol à long et à court terme ces paramètres sont :

- **Les paramètres Physiques & chimiques:** porosité, indice des vides, densité, limites d'Atterberg, perméabilité, teneur en carbonate, teneurs en chlorure, teneur en sulfate...
- **Les paramètres de déformation :** indice des compressions, indice de gonflement, module œdométrique
- **Les paramètres de déformations mécaniques :** cohésion, angle de frottement interne, pression limite

Ces paramètres considérés comme variables sont utilisées dans l'étude statistique et dans le calcul des corrélations selon le type de sol. Le tableau ci-dessous résume les paramètres utilisés dans le calcul des corrélations :

Tableau 1.1: Paramètres des sols utilisés dans les corrélations (Boutonnier 2007)

Auteurs	Type de sol	Paramètres utilisés dans les corrélations
Fleureau et al (2002)	Sol fin	<ul style="list-style-type: none"> - Limite de liquidité W_L - Teneur en eau optimale w_{opt} (pour le Proctor normal et modifié)
Aubertin et al (2003)	Sol granulaire	<ul style="list-style-type: none"> - Indice des vides « e » - D_{10} (passant à 10%) - Cu
Aubertin et al (2003)	Sol fin	<ul style="list-style-type: none"> - Indice des vides « e » - Limite de liquidité W_L - Le poids volumique sec γ_s
Coté et Kounard (2003)	Matériaux granulaires avec faibles pourcentage de fines	<ul style="list-style-type: none"> - La porosité n - La courbe granulométrique - La surface spécifique de la fraction fine

3. Effets de la variation des propriétés du sol sur son comportement :

Il a été montré que la variabilité naturelle des propriétés de sol dans des couches homogènes et géologiquement différentes affecte le comportement du sol. Les travaux précédents dans ce domaine ont entamé ces effets sur :

- ✓ L'infiltration à travers les sols dans un champ aléatoire.
- ✓ Le tassement.
- ✓ Le potentiel de liquéfaction.
- ✓ La réponse sismique des sols.
- ✓ La propagation des ondes sismiques à travers les sols hétérogènes.
- ✓ La stabilité des pentes.

La mécanique des sols et des roches doit donc découvrir et décrire le matériau avant d'en modéliser le comportement mécanique ou physique. Une fois le matériau identifié et ses frontières définies, on peut alors utiliser des modèles de calcul, dont certains sont issus de la mécanique des milieux continus, d'autres de la mécanique des solides ou de la mécanique des fluides, avant d'en interpréter les résultats pour répondre aux questions posées. Une des

difficultés de la mécanique des sols et des roches réside justement dans l'interaction de la reconnaissance des sites et de la modélisation, la qualité des analyses et des prévisions dépendant autant de l'une que de l'autre. [Houmadi 2011]

Pour le mécanicien des sols, dont l'objectif final est de dimensionner des ouvrages, cette variabilité naturelle ne présente d'intérêt que par ses conséquences sur les propriétés physiques et mécaniques qu'il utilise dans ses calculs et éventuellement par ses conséquences sur les modèles de calcul eux-mêmes.

En tout état de cause, connaissant cette variabilité naturelle des sols ainsi que le nombre restreint de sondages et d'essais effectués, on peut facilement imaginer la part de subjectivité qui entre dans la détermination des valeurs représentatives des caractéristiques physiques et mécaniques des sols.

En effet, le choix de ces valeurs relève en grande partie du savoir-faire de l'ingénieur praticien et, selon son expérience, il présentera le résultat de son calcul comme une valeur précise et fiable ou comme une valeur prévisionnelle précise à 10 ou 20% près.

Une nouvelle approche de la mécanique des sols s'imposait donc pour tenter de résoudre ces problèmes d'hétérogénéité des sols et de modélisation de leur comportement ou du moins pour mieux les appréhender. Les méthodes statistiques et probabilistes sont donc venues compléter les méthodes déterministes classiques. [Megnounif, 2014]

4. Statistiques en géotechnique :

A l'origine l'utilisation des méthodes statistiques a voulu satisfaire aux deux objectifs suivants :

Caractériser la variabilité naturelle des sols pour l'introduire dans les schémas de calcul classiques des fondations des ouvrages. Comme il est impossible de déterminer en tout point les propriétés d'un sol sur le site d'un projet, l'ingénieur doit choisir des valeurs (moyennes par exemple) représentatives de ces propriétés.

Le choix de ces valeurs conditionnant fortement la confiance que l'on peut accorder aux calculs, le premier but a été donc de contrôler la fiabilité des données et d'estimer la précision des résultats [Houmadi, 2004].

Augmenter l'efficacité de la reconnaissance géotechnique. Celle-ci étant budgétairement limitée, il paraît important de l'optimiser en jouant par exemple sur le type, le nombre et la position des sondages. Pour cela on a cherché à utiliser au mieux les corrélations existant entre les différentes propriétés des sols.

Cette démarche est particulièrement intéressante car les méthodes de détermination de

ces propriétés sont plus ou moins rapides que peu d'essais longs et complexes [Abdul Baki et al., 1993]

L'utilisation de méthodes statistiques simples en géotechnique a fourni des techniques adaptées aux besoins particuliers de la pratique géotechnique. Ces méthodes fournissent des moyens pour s'adapter aux changements récents et pour améliorer la pratique du génie géotechnique.

Ces méthodes statistiques sont bien adaptées au traitement automatique des données; ils fournissent une procédure explicite et répétable pour obtenir des valeurs de paramètres; et ils permettent d'attribuer des niveaux de confiance quantifiés aux estimations de paramètres. [Uzielli, 2008]

4.1. Variabilité et incertitude dans les données géotechniques :

La variabilité des données géotechniques peut être attribuée aux sols. Les sols sont des matériaux naturels, qui sont formés et en continu modifié par des processus complexes. La variété et la complexité de ces processus se traduisent par une hétérogénéité physique et, par conséquent, par la variabilité des paramètres quantitatifs. Variabilité inhérente du sol décrit la variation des propriétés d'un emplacement spatial à un autre à l'intérieur d'une masse de sol.

4.2. Modèles d'incertitude géotechnique :

S'il est intéressant de contourner les effets indésirables des analyses de variabilité totale, une évaluation rationnelle du niveau d'incertitude dans un paramètre géotechnique mesuré ou dérivé peut être faite en utilisant un modèle d'incertitude. [Phoon&Kulhawy, 1999], par exemple, ont proposé un modèle additif pour le coefficient de variation total d'un paramètre de conception ponctuelle obtenu à partir d'une seule propriété mesurée à l'aide d'un modèle de transformation:

$$Cov_{tot,D}^2 = \frac{\delta}{L} Cov_w^2 + Cov_m^2 + Cov_{se}^2 + Cov_M^2 \dots (2.1)$$

Dans lequel Cov_{tot} est le coefficient de variation total de la propriété de conception; $\frac{\delta}{L}$ est une approximation de la réduction de la variance à cause de moyenne spatiale (d'où δ est l'échelle de fluctuation de la propriété de conception et L est l'étendue spatiale d'intérêt pour la conception) Cov_w est le coefficient de variation de la variabilité inhérente de la valeur mesurée propriété ; Cov_{se} est le coefficient de variation de l'incertitude d'estimation statistique ; Cov_m est le coefficient de variation de l'incertitude de mesure de la propriété mesurée ; Cov_M est le coefficient de variation de l'incertitude de transformation de la

transformation modèle.

Dans les modèles d'incertitude quantitatifs, les composantes de l'incertitude sont généralement supposées être statistiquement non corrélées; d'où l'absence de termes de corrélation dans l'équation (2.1). Ce n'est qu'approximativement vrai: par exemple, la quantification de la variabilité nécessite des données à partir de mesures des propriétés d'intérêt du sol.

Différentes méthodes de mesure géotechnique, qu'elles soient effectuées en laboratoire ou in-situ, induiront généralement différents modes de défaillance dans un volume de sol. Cela se traduit généralement par des valeurs différentes de la même propriété mesurée.

Les données mesurées sont par conséquent liées aux modes de défaillance spécifiques aux tests. Le type et l'ampleur de la variabilité ne peuvent donc pas être considérés comme des propriétés inhérentes à un volume de sol, mais sont liés au type de technique de mesure. La dispersion due à des variations à petite échelle mais réelles des propriétés mesurées du sol est parfois attribuée à tort à une erreur de mesure. Compte tenu de ce qui précède, il est extrêmement difficile de séparer les composantes de l'incertitude géotechnique. L'hypothèse de sources d'incertitude non corrélées, bien qu'approximatives. [Uzielli, 2008]

4.3. Analyse statistique de second moment :

Si un ensemble de données se rapportant à un paramètre spécifique est adressé statistiquement, ce paramètre peut être appelé Variable aléatoire. Pour les données géotechniques, étant donné la taille généralement limitée des échantillons, il suffit généralement de se référer à analyse au second moment.

Dans les approches au second moment, l'incertitude d'une variable aléatoire peut être étudiée à travers ses deux premiers moments, c'est-à-dire la moyenne (paramètre a tendance centrale) et la variance (paramètre a tendance dispersive). [Uzielli, 2008]

La moyenne de l'échantillon, c'est-à-dire la moyenne d'un échantillon $\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_n$ d'une variable aléatoire est donné :

$$M_\varepsilon = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \varepsilon_i \dots (2.2)$$

La variance de l'échantillon d'un ensemble de données est le carré de l'écart type de l'échantillon de l'ensemble lui-même. Ce dernier est donné par :

$$V_{\varepsilon} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\varepsilon_i - M_{\varepsilon})^2} \dots (2.3)$$

L'échantillon de coefficient de variation est obtenu en divisant l'écart type de l'échantillon par la moyenne de l'échantillon. Il fournit une mesure concise de la dispersion relative des données autour de l'estimateur de tendance central:

$$Cov_{\varepsilon} = \frac{V_{\varepsilon}}{M_{\varepsilon}} \dots (2.4)$$

Le coefficient de variation est fréquemment utilisé dans les analyses de variabilité. Il est sans dimension et, dans la plupart des cas, fournit une mesure de dispersion plus importante physiquement par rapport à la moyenne. Cependant, il faut noter qu'il s'agit d'un rapport très sensible, par exemple en cas de petites valeurs moyennes. [Harr,1987] a fourni une « règle empirique » selon laquelle les coefficients de variation inférieurs à 0,10 sont considérés comme « faibles », entre 0,15 et 0,30 « modérés » et supérieurs à 0,30, « élevé ».

4.3.1. Analyse statistique de second moment des variables aléatoires indépendantes :

Les paramètres tels que la teneur en eau, l'indice de plasticité et le poids unitaire ne sont en principe pas liés de manière univoque à conditions in situ spécifiques. Par exemple, ils ne sont pas affectés par l'état de contrainte in situ et, par conséquent, ne montrent pas toujours une tendance avec la profondeur. Ceux-ci peuvent être définis comme variables aléatoires indépendantes à des fins d'analyse statistique. [Uzielli, 2008]

À titre d'exemple de la littérature sur les meilleures pratiques d'analyse du second moment de variables aléatoires indépendantes, les résultats d'une enquête sur les caractéristiques physiques des sols (Rétháti,1988) pour 5 types de sols sous-jacents à la ville de Szeged tel que :

- Sol 1: argile limoneuse organique
- Sol 2: lœss (limons calcaires fins) au-dessus du niveau de la nappe phréatique
- Sol 3: lœss sous le niveau de la nappe phréatique
- Sol 4: argile
- Sol 5: argile-limon

En utilisant les résultats d'environ 11000 tests sur 2600 échantillons sont présentés. Valeurs moyennes et Cov de teneur en eau w , indice de plasticité I_p , indice de cohérence I_c , indice

des vides e , degré de saturation S_r , poids volumique γ sont rapportées dans le tableau 1.

Tableau 2.2: Statistiques d'échantillons au second moment des sols de Szeged (Rétháti, 1988).

	Sol	w (%)	w_l (%)	w_p (%)	I_p (%)	I_c	e	S_r	γ ($\frac{KN}{m^3}$)
Moyenne	S1	31.1	44.5	24.2	20.6	0.62	0.866	0.917	18.8
	S2	22.3	32.3	19.4	13.0	0.82	0.674	0.871	19.7
	S3	24.5	32.2	20.7	11.5	0.63	0.697	0.902	19.7
	S4	28.3	54.0	24.2	29.9	0.86	0.821	0.901	19.3
	S5	28.6	52.8	25.4	27.4	0.82	0.823	0.905	19.2
Cov	S1	0.30	0.39	0.34	0.57	0.49	0.26	0.10	0.07
	S2	0.18	0.13	0.12	0.37	0.37	0.13	0.12	0.04
	S3	0.15	0.13	0.11	0.36	0.47	0.13	0.11	0.04
	S4	0.17	0.21	0.14	0.34	0.20	0.11	0.10	0.03
	S5	0.17	0.27	0.15	0.44	0.31	0.12	0.10	0.03

4.3.2. Analyse statistique de second moment des variables dépendantes :

L'ampleur et la variabilité de nombreux paramètres géotechniques sont liées à d'autres paramètres. Par exemple, la résistance au cisaillement non drainé d'un sol cohésif varie généralement avec la profondeur (même si le sol est de composition homogène) en raison de l'augmentation des contraintes, des effets de surconsolidation et d'autres facteurs in situ.

Ces paramètres, lorsqu'ils sont traités statistiquement, peuvent être appelés variables aléatoires dépendantes.

Ces variables affichent généralement tendances spatiales qui sont dus à une ou plusieurs variables aléatoires indépendantes. La décomposition de données provenant d'échantillons de variables aléatoires dépendantes est souvent obtenue en utilisant la régression statistique. [Uzielli, 2008].

La figure ci-dessous représente le schéma de régression linéaire pour les paramètres de résistance au cisaillement en fonction des profondeurs.

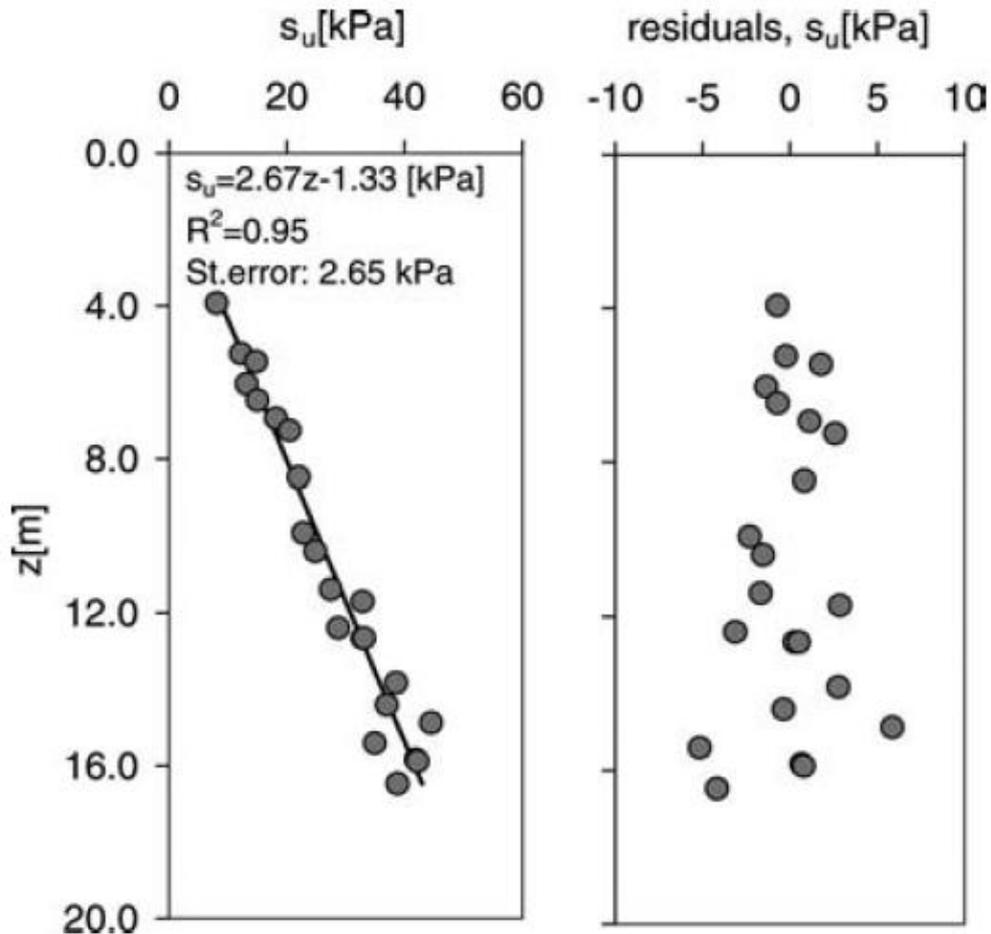


Figure 2.1: Décomposition des données de résistance au cisaillement non drainés des essais CAUC dans un sol homogène d'argiles marines. Le graphe (a) : tendance linéaire. Le graphe (b) : résidus de dégradation. (Uzielli; 2008).

La régression des moindres carrés est largement utilisée pour estimer les paramètres à adapter à un ensemble de données pour caractériser les propriétés statistiques des estimations. Les principaux résultats de l'analyse de régression sont les paramètres qui décrivent la tendance de manière analytique et les paramètres qui évaluent la fiabilité du modèle de régression de sortie.

Ces paramètres comprennent le coefficient de détermination, qui fournit une indication de combien de la variance de la variable dépendante peut être décrite par les variables indépendantes qui sont incluses dans le modèle de régression et combien par la variabilité inhérente, et l'erreur standard du modèle de régression, qui équivaut à l'écart type des erreurs de prédiction du modèle, et fournit une mesure de l'incertitude dans le modèle de régression lui-même.

Dans la perspective des meilleures pratiques, il est très important de rapporter ces paramètres explicitement avec le modèle de régression. [Uzielli, 2008]

La figure ci-dessous représente le schéma de la méthode des moindres carrés

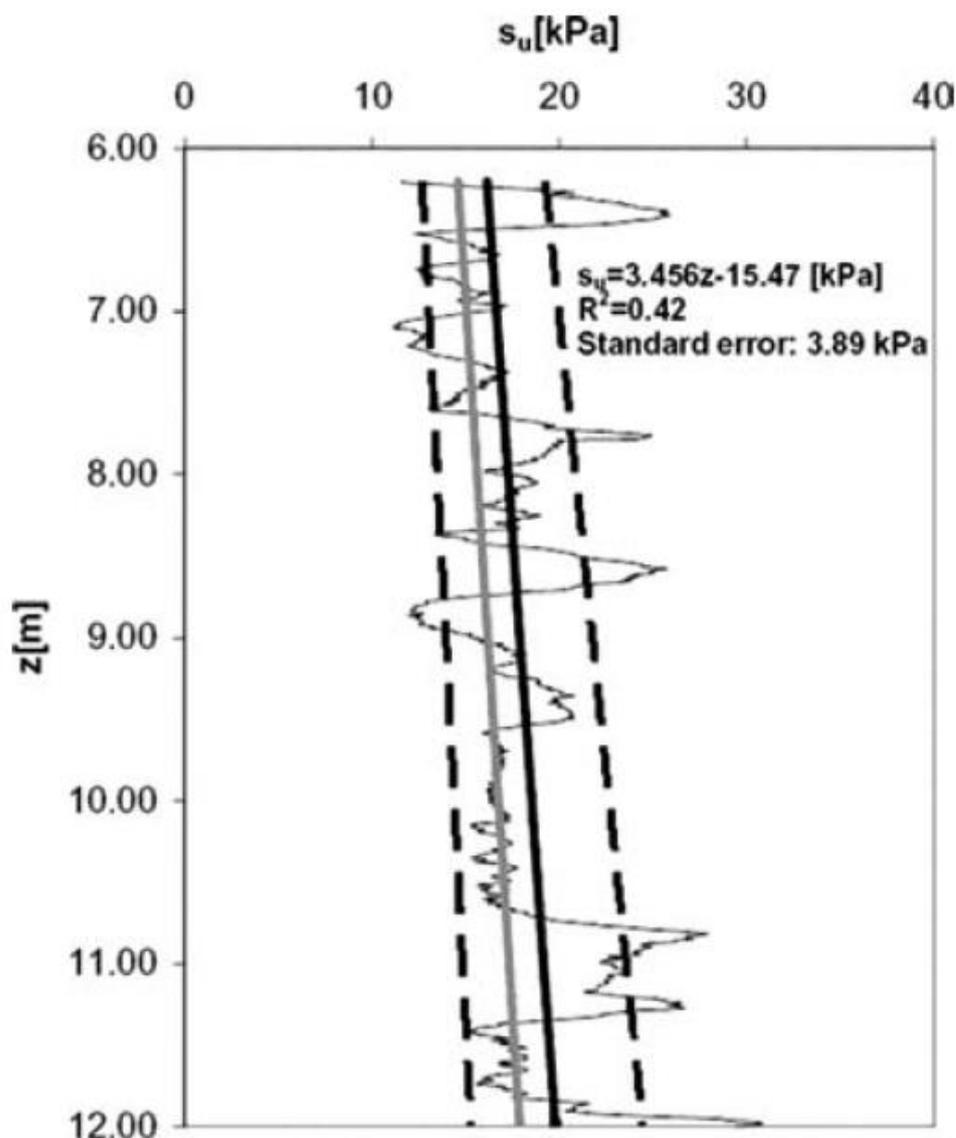


Figure 2.2: Régression linéaire généralisée carrée de la résistance au cisaillement non drainée calculée à partir des tests CPT et profil de conception subjectif [Lacasse et al. 2007].

4.4. La géostatistique :

G.Matheron (1962) a édité son ouvrage sur la géostatistique présentant un éclairage nouveau et original de l'estimation minière et recevant quelques années plus tard une base mathématique solide de la théorie des variables régionalisées [Matheron, 1970]. Depuis, des outils mathématiques de plus en plus puissants ont été construits dans le domaine de l'estimation minière et de la recherche pétrolière notamment.

La géostatistique est basée sur des variables régionalisées ayant des propriétés qui sont en partie aléatoire et en partie spatiale et qui ont la continuité d'un point [Clark, 1979].

L'une des mesures statistiques de base de la géostatistique est le semivariogramme, qui est utilisé pour quantifier le degré de dépendance spatiale entre les échantillons le long d'une orientation spécifique et présente le degré de continuité de la propriété en question.

Le variogramme a été largement utilisé dans l'étude de la variabilité spatiale des paramètres géotechniques, il a été utilisé en relation avec des données continues à intervalles rapprochés, réguliers et fixes, principalement des données du CPT [Bacconnet,1991].

On considère une variable aléatoire $Z(.)$, un domaine spatial D , et un échantillon de mesures $(s_1), Z(s_2), \dots, Z(s_n)$, où s_1, s_2, \dots, s_n représentent la position spatiale ou le site de réalisation des mesures. Le variogramme est un outil qui permet de caractériser la dépendance spatiale de la variable $Z(.)$ sur le domaine D . On distingue le variogramme théorique et le variogramme expérimental. [Benhachilif, 2016]

4.5. La dépendance statistique et la stationnarité :

Lorsqu'il s'agit de plusieurs variables aléatoires, les incertitudes de l'une peuvent être associées à des incertitudes d'une autre, c'est-à-dire que les incertitudes des deux variables peuvent ne pas être indépendantes.

Une telle dépendance (qui peut être très difficile à identifier et à estimer) peut être essentielle pour obtenir des résultats numériques appropriés dans des applications d'ingénierie utilisant des techniques probabilisées bien connues telles que l'approximation du premier ordre au second moment (FOSM) et la fiabilité du premier ordre. Méthode (FORM). La négligence de la corrélation peut entraîner une conception excessive ou insuffisante, selon la nature de la corrélation.

Il existe deux approches générales pour tester la dépendance statistique: paramétrique et non paramétrique. Les approches paramétriques nécessitent la formulation d'hypothèses concernant la nature et la distribution de l'ensemble de données étudié. Les approches non paramétriques, au contraire, ne font pas de telles hypothèses de base.

Par conséquent, ces derniers sont plus largement applicables que les tests paramétriques qui exigent souvent la normalité des données. Bien que plus largement applicables, le compromis est que les tests non paramétriques sont moins puissants que les tests paramétriques.[Uzielli, 2008]

La mesure la plus courante de la dépendance statistique parmi les variables aléatoires est Coefficient de corrélation linéaire de Pearson. Cela mesure le degré auquel une quantité incertaine varie linéairement avec un autre. Le coefficient de corrélation est non dimensionnel et varie dans la plage $[-1, +1]$.

Une borne supérieure implique une relation linéaire stricte de pente positive (par exemple, figure 2.3), tandis que la borne inférieure atteste d'une relation linéaire stricte de pente négative. Plus la magnitude est élevée, plus les données se rapprochent d'une ligne droite.

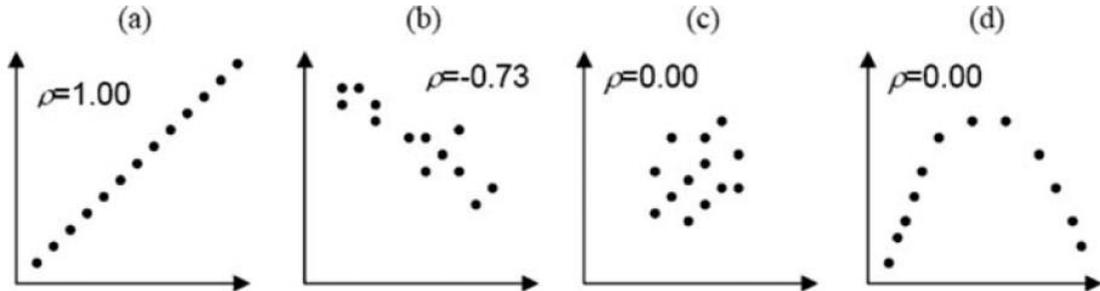


Figure 2.3: Exemples de coefficient de corrélation entre deux variables. (Uzielli, 2008)

La stationnarité est souvent une condition préalable importante pour les analyses de la variabilité spatiale des propriétés du sol parce que de nombreuses procédures statistiques qui y sont employées sont basées sur l'hypothèse que les échantillons de données comprennent au moins faiblement des observations stationnaire.

Un processus est dit stationnaire au sens du second ordre (ou faiblement stationnaire) si:

- Sa moyenne est constante (c'est-à-dire qu'il n'y a pas de tendances dans les données)
- Sa variance est constante
- Sa corrélation entre les valeurs en deux points quelconques à des emplacements spatiaux distincts, dépend uniquement de l'intervalle dans la distance spatiale entre les points, et non de l'emplacement spatial spécifique des points eux-mêmes.

Dans le cas des tests géotechniques en laboratoire ou in situ, la stationnarité ne peut généralement être identifiée que dans un sens faible ou de second ordre en raison des limitations de la taille de l'échantillon.

4.6. Loi de distribution des propriétés du sol :

Parmi les nombreuses lois de distribution envisageables, la loi normale est la plus utilisée par les géotechniciens, où la distribution d'une somme de variables tend vers une distribution normale quand le nombre de variables de la somme devient grand.

Or les propriétés des sols auxquels s'intéresse le mécanicien des sols ne sont pas en général des propriétés élémentaires, mais des résultantes de nombreux phénomènes physico-chimiques élémentaires. Si ces phénomènes sont assez nombreux on peut espérer que leur résultante suive une loi normale.

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

En 1970, LUMB a montré que le paramètre (C') se conforme en fait à une distribution bêta asymétrique mais que, néanmoins, la partie centrale de la distribution peut être considérée comme normale.

LUMB considère que les résultats obtenus sur le sol de Hong-Kong doivent être généraux et s'appliquer aussi ailleurs (HARR, 1977)

Le tableau ci-dessous représente les résultats de l'étude de LUMB (1966) :

Tableau 2.3: Teste de normalité pour les propriétés d'un sol de Hong-Kong (LUMB, 1966)

Argile marine :

- Argile sableuse :

Paramètre	Degré de liberté	D_1	$x^2_{0.95}$	Paramètre	Degré de liberté	D_1	$x^2_{0.95}$
Limite de liquidité	17	17.5	27.6	Limite de liquidité	7	6.3	14.1
Limite de plasticité	7	7	14.1	Limite de plasticité	7	1.9	14.1
Indice de plasticité	17	15.7	27.6	Indice de plasticité	7	11.8	14.1
Indice de liquidité	17	24.7	27.6	Indice de liquidité	7	10.7	14.1
Résistance à la compression uniaxiale	16	19	26.3				

Les études de SCHULTZ en 1972, confirment les résultats obtenus par LUMB. SCHULTZ a montré que la plupart des paramètres étudiés suivent une loi normale, la résistance de compression simple, un coefficient de variation très élevé. [Layati, 1999]

5. Exemples d'application des statistiques en géotechnique:

Durant les quinze dernières années, les travaux des laboratoires des ponts et chaussées ont porté sur : [Magnan, 1996]

- Une analyse bibliographique générale des travaux réalisés dans le monde jusqu'à 1980 (Magnan et Baghery, 1982)

- la variabilité des propriétés des argiles molles organiques du site expérimental de Cubzac-les-Ponts (Baghery et Magnan, 1983 ; Magnan et Baghery, 1982 ; Haghgou, 1983).
- la stabilité et les tassements au cours du temps des remblais expérimentaux A (remblai à la rupture) et B (coefficient de sécurité de 1,5) de Cubzac-les-Ponts [Baghery et Magnan, 1983 ; Magnan et Baghery, 1982]
- la variabilité des propriétés des dépôts de pentes argileux sur le site expérimental de Sallèdes [Abdul Baki et al, 1993 ; Magnan et al, 1993].
- le calcul en éléments finis des déformations d'un massif de sols à propriétés aléatoires, en tenant compte de l'autocorrélation des paramètres dans les directions verticale et horizontale [Boulefkhad, 1986]
- l'analyse paramétrique de l'effet de la variabilité de la compressibilité et de la perméabilité des sols sur le déroulement de la consolidation unidimensionnelle et bidimensionnelle [Bouheraoua, 1989 ; Magnan, 1989; Magnan et Bouheraoua, 1996]

Ces travaux de recherche ont été complétés par la rédaction de quelques articles de synthèse ou de réflexion [Magnan, 1986, 1988 ; Favre et al 1988 ; Jacob et al, 1988 ; Magnan et Bouheraoua, 1995].

Les travaux en cours portent sur l'analyse de données expérimentales et sur la répartition de la sécurité entre les diverses composantes des calculs de justification des ouvrages. [Magnan, 1996]

Pour ces travaux, de nombreux outils et techniques d'analyse ont été utilisés :

- analyse statistique classique,
- fonctions de variables aléatoires,
- géostatistiques et krigeage,
- théorie des champs aléatoires (autocorrélation),
- logiciel d'analyse de données (Statgraphics), et divers programmes de calcul développés spécifiquement.

Les conclusions tirées des travaux évoqués ci-dessus ont été grandement influencées par les résultats de certaines de ces études, qui ont mis en évidence les biais de méthodes de calcul, la difficulté de caler les niveaux de risques correspondant aux dimensionnements traditionnels et les insuffisances des données géotechniques disponibles.

5.1. Exemple de tassements au cours du temps du remblai B de Cubzac-les-Ponts :

L'étude des tassements effectuée par Baghery et Magnan (1983) s'appuie sur la théorie de la consolidation unidimensionnelle pour le calcul du degré de consolidation, avec un tassement final déduit des courbes de compressibilité oedométrique. Pour cette étude, le sol de fondation argileux a été divisé en neuf couches d'un mètre d'épaisseur.

Le traitement probabiliste a été effectué par la méthode de Monte-Carlo. Les paramètres considérés comme aléatoires étaient :

- l'indice des vides initial e_0
- l'indice de gonflement C_s
- l'indice de compression C_c
- le poids volumique du sol γ
- la pression de préconsolidation σ'_p
- le coefficient de consolidation C_v

La figure 2.4 regroupe les principaux résultats de cette analyse :

- histogramme des valeurs du degré de consolidation au bout de 1100 jours,
- histogramme des valeurs du tassement final,
- histogramme des valeurs calculées du tassement au bout de 1100 jours.

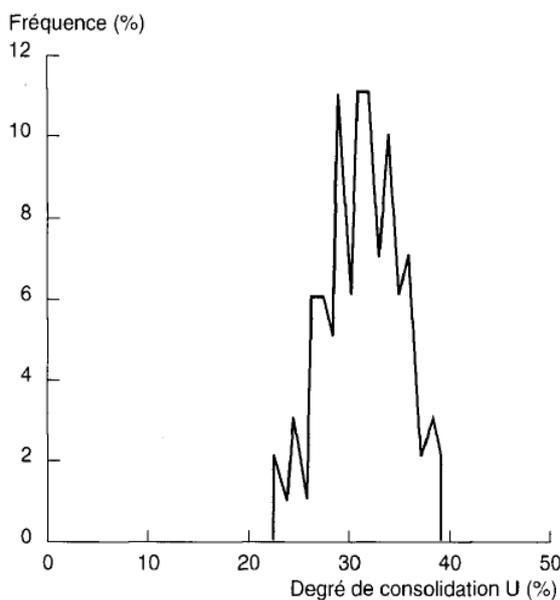


Figure a : Histogramme des valeurs calculées du degré de consolidation à 1100 jours

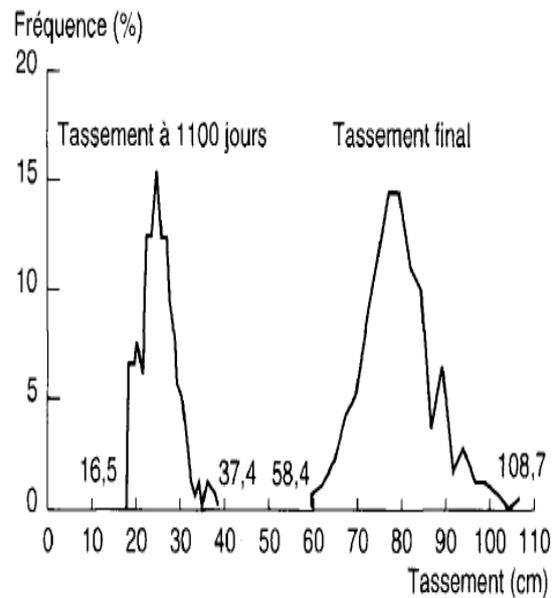


Figure b Histogrammes des valeurs calculées du tassement à 1100 jours et du tassement final.

Figure 2.4:Degrés de consolidation à 1100 jours, tassement final et tassement à 1100 jours résultat d'un calcul probabiliste [Baghery et Magnan, 1983].

5.2. Evaluation des risques de liquéfaction par la méthode statistique :

Cette méthode a pour but de prédire le risque de liquéfaction d'un sol en utilisant uniquement ses principales propriétés mécaniques, sa densité relative ainsi que les caractéristiques classiques du signal d'entrée. Les variables qui forment la résistance cyclique sont : le nombre de coups $N_{1,60}$ de l'essai SPT et le pourcentage des fines.

Hilldale (1971), Harr (1987) et Phoon et Kulhawy (1996 et 1999), ont analysé les erreurs de mesures probables dans différents types des essais in-situ incluant l'essai SPT, et ils ont reporté un coefficient de variation du nombre de coups $N_{1,60}$ entre 15 et 45%.

Le Tableau 2.4 regroupe les coefficients de variation des toutes les variables aléatoires utilisées dans la détermination du risque de liquéfaction.

Tableau 2.4: Valeurs des coefficients de variation des paramètres de la résistance et la contrainte cyclique. (Ayad, 2014)

Variables aléatoires	<i>Cov</i>	Références	Loi adoptée	Références
$N_{1.60}$	0.1- 0.4 0.15- 0.45	Harr (1987) ; Gutierrez et al (2003) ; Phoon et Kulhaway (1999) Jones et al 2002	Normal	Salloum (2008)
FC	0.05- 0.35	Gutierrez et al (2003)		
σ'_v	0.1- 0.2 0.05- 0.20	Salloum (2008) Juang et al (1999)	Normal	Salloum (2008)
σ_v	0.05 - 0.20	Juang et al (1999)	Normal	Salloum (2008)
a_{max}	0.1 - 0.2	Juang et al (1999)	Log-normal	S.K. Jha, K. Suzuki (2009)
M_w	0.05 – 0.10	Juang et al	Normal	Salloum (2008)

6. Conclusion :

La reconnaissance des variables géotechniques a pour objectif la caractérisation et la conception du sol et son comportement. La statistique possède de nombreuses procédures qui permettent l'évaluation de ces incertitudes, cette évaluation aboutie à une amélioration du degré de risque.

A partir de ce chapitre, on peut conclure qu'une étude approfondie de l'hétérogénéité du sol et la prise en considération des différentes sources d'incertitudes est impératives pour différentes investigations géotechniques.

Chapitre 3 :
Analyse statistique des données géotechniques
(site d'Alger)

Chapitre 3: Analyse statistique des données géotechniques pour différents sols (site d'Alger)

1. Introduction

Cette partie est consacrée à une étude pratique qui est donc une analyse statistique des données géotechniques de plusieurs prélèvements effectués à Alger. Nous nous proposons dans ce chapitre d'abord de classer dans des tableaux distincts chaque sol pour les différents sondages prélevés par l'essai CPT, ensuite analyser statistiquement les sondages.

2. Origine et analyse des sondages :

Les données que nous traiterons dans cette étude proviennent d'une riche campagne de sondages effectués sur toute la région d'Alger (1222 sondages). La première étape consiste à séparer chaque type de sol pour chaque sondage afin de traiter statistiquement les différents types ; ensuite l'analyse se fera en utilisant les méthodes statistiques présentées dans le premier chapitre. Un exemple de traitement d'un sol argileux est déterminé dans ce qui suit.

- La localisation du terrain est représentée dans la carte suivante :

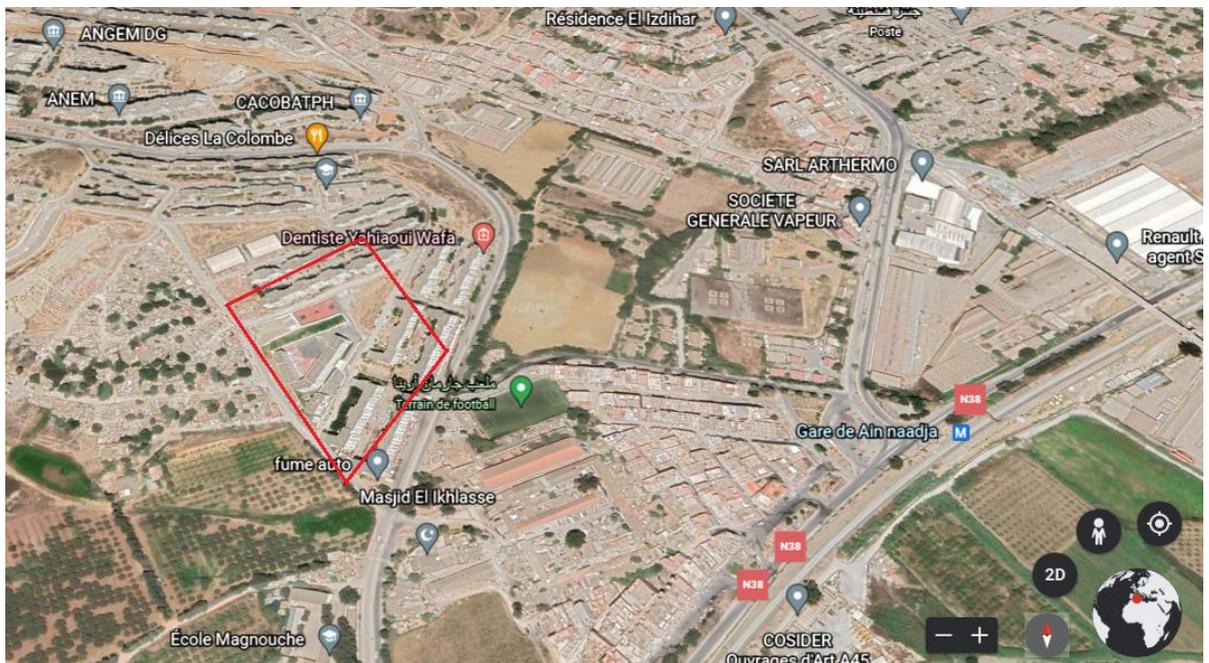


Figure 3.1 : Localisation du site étudié.

Un ensemble de sondages ont été effectués sur ce site, nous avons pu localiser quelques sondages pour notre analyse dont les coordonnées sont connues. Tel que nous pouvons le voir sur la figure suivante :

L'implantation des sondages

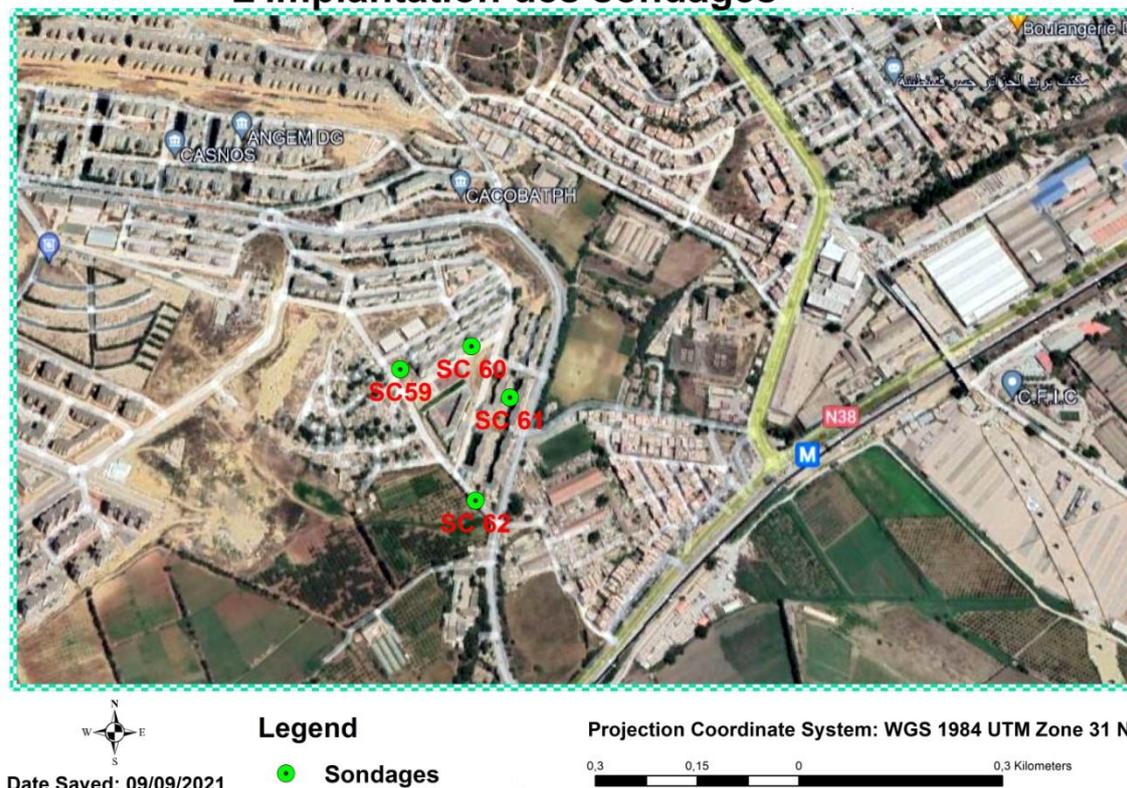


Figure 3.2 : Localisation des implantations des sondages du site étudié.

2.1. Définition de la méthode de prélèvement :

La méthode de test CPT consiste à utiliser un équipement hydraulique pour enfoncer un cône normalisé dans le sol via un jeu de tiges. La résistance rencontrée pour pénétrer le sol à une vitesse contrôlée de deux centimètres par seconde est mesurée en continu. La force globale agissant sur le cône est appelée la résistance au cône et donne des indications sur la portance de votre sol. La force agissant sur les tiges de sondage détermine le frottement total.

2.2. Résultats des calculs : sol argileux

Les résultats des calculs pour chaque type de sol sont présentés sous forme de tableaux. Dans le but de déterminer la dispersion du sol ainsi que les relations entre ses différents paramètres nous allons calculer la moyenne, l'écart-type, la médiane ainsi que le maximum pour chaque paramètre du sol ainsi le calcul de corrélation entre les paramètres et ce en réalisant des matrices de corrélation afin de déterminer la dépendance entre les

variables en même temps. Nous allons étudier les caractéristiques d'un sol argileux.

Les variables géotechniques que nous traitons dans notre étude sont des variables indépendantes.

Les calculs sont faits à l'aide de Microsoft Excel 2007.

Le tableau 3.1 représente le calcul de la moyenne l'écart-type et la variance pour les paramètres du sol argileux.

Le tableau 3.2 représente le calcul de la matrice de corrélation des différents paramètres du sol argileux.

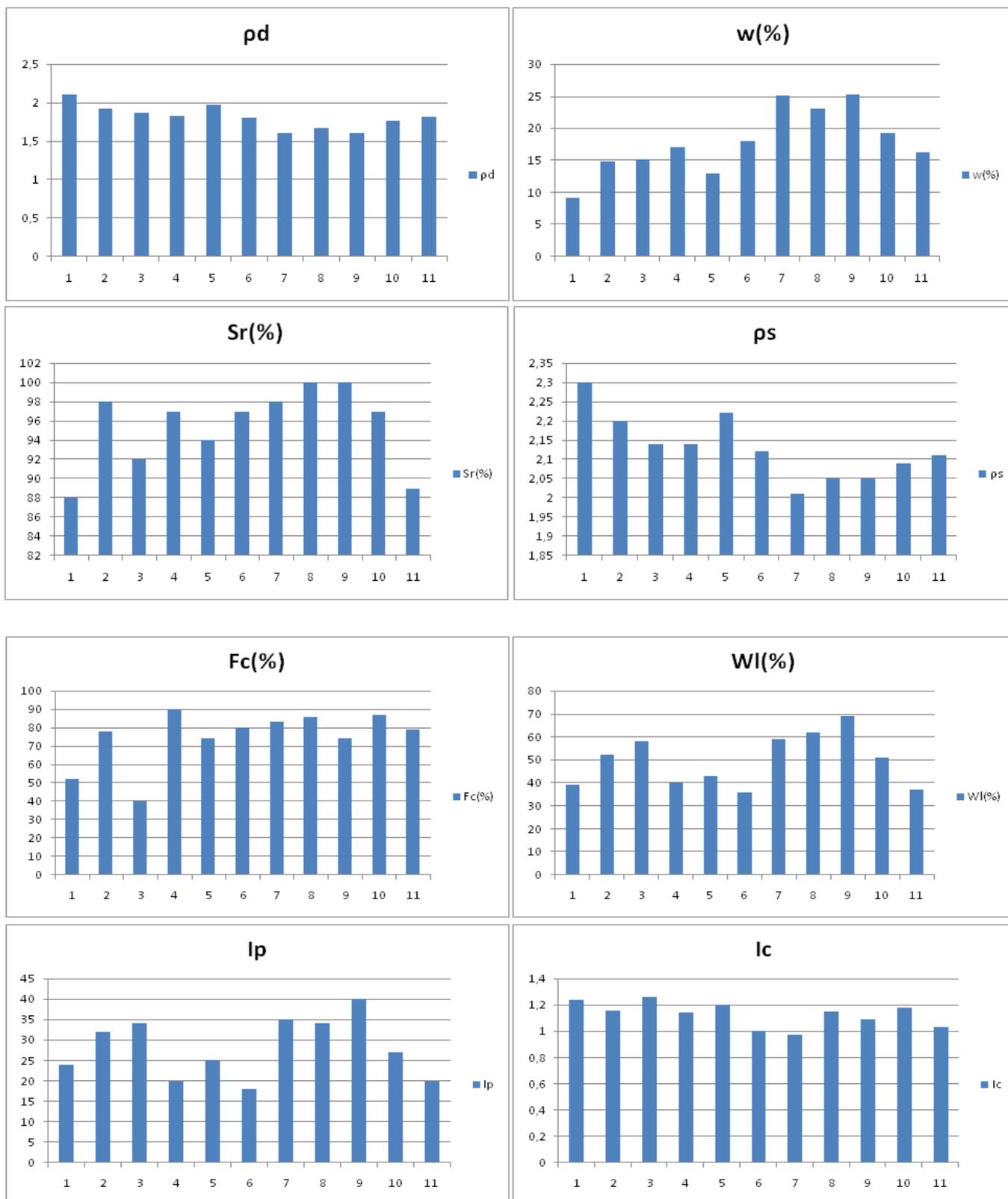
Tableau 3.1: Résultats de calcul de paramètres de distribution et de dispersion des données :

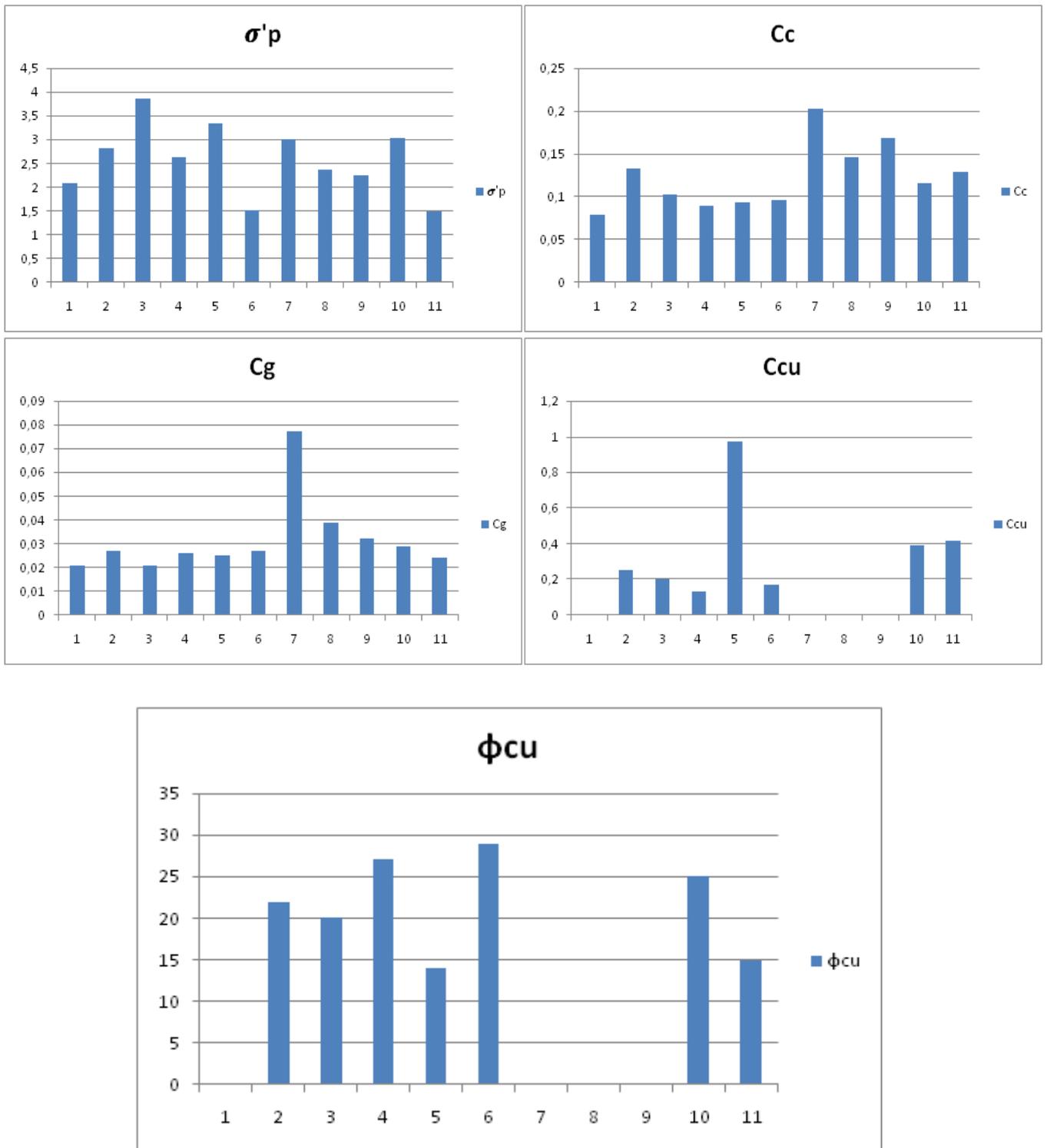
	$\rho_d \left(\frac{t}{m^3}\right)$	w(%)	Sr(%)	$\rho_s \left(\frac{t}{m^3}\right)$	Fc(%)	Wl(%)	Ip	Ic	σ'_p (bar)	Cc	Cg	Ccu(bar)	Φ_{cu} (°)
Moyenne	1,81	17,80	95,45	2,13	74,81	49,63	28,09	1,12	2,58	0,12	0,03	0,40	20
Max	2,11	25,2	100	2,3	90	69	40	1,26	3,86	0,20	0,07	0,97	29
Médiane	1,81	17,1	97	2,12	79	51	27	1,15	2,63	0,11	0,02	0,25	22
Ecart-type	0,15	5,04	4,15	0,08	15,3	11,35	7,31	0,09	0,73	0,03	0,01	0,28	5,76
Variance	0,02	25,48	17,2	0	235,9	128,8	53,49	0	0,53	0	0	0,083	33,23

Tableau 3.2 : Matrice de corrélation des paramètres géotechniques :

	ρ_d	w	Sr	ρ_s	Fc	Wl	Ip	Ic	σ'_p	Cc	Cg	Ccu	Φ_{cu}
ρ_d	1	-0.98	-0.70	0.98	-0.70	0.98	-0.49	0.62	0.062	-0.81	-0.65	0.55	-0.56
w	-0.98	1	0.74	-0.95	0.51	-0.62	-0.55	-0.60	-0.05	0.83	0.68	-0.56	0.73
Sr	-0.70	0.74	1	-0.63	0.61	0.59	0.47	-0.31	0.11	0.53	0.44	-0.27	0.74
ρ_s	0.98	-0.95	-0.63	1	-0.48	-0.58	-0.43	0.62	0.03	-0.77	-0.64	0.51	-0.43
Fc	-0.51	0.51	0.61	-0.48	1	-0.05	-0.18	-0.56	-0.31	0.32	0.36	0.02	0.34
Wl	-0.63	-0.62	0.59	-0.58	-0.05	1	0.97	0.04	0.42	0.71	0.43	-0.10	-0.08
Ip	-0.49	-0.55	0.47	-0.43	-0.18	0.97	1	0.10	0.46	0.69	0.43	0	-0.23
Ic	0.62	-0.60	-0.31	0.62	-0.56	0.04	0.10	1	0.54	-0.58	-0.59	0.22	-0.25
σ'_p	0.06	-0.05	0.11	0.03	-0.31	0.42	0.46	0.54	1	0.02	0.12	0.24	-0.22
Cc	-0.81	0.83	0.53	-0.77	0.32	0.71	0.69	-0.58	0.02	1	0.82	-0.09	-0.27
Cg	-0.65	0.68	0.44	-0.64	0.36	0.43	0.43	-0.59	0.12	0.82	1	-0.03	0.52
Ccu	0.55	-0.56	-0.27	0.51	0.02	-0.10	0	0.22	0.24	-0.09	-0.03	1	-0.73
Φ_{cu}	-0.56	0.73	0.74	-0.43	0.34	-0.08	-0.23	-0.25	-0.22	-0.27	0.52	-0.73	1

Histogrammes des fréquences : La figure 3.1 suivante montre les histogrammes des paramètres :





Figures 3.2 : Histogrammes des distributions des paramètres.

2.3. Interprétations des résultats :

Dans l'analyse statistique des données géotechniques, on fait appel aux caractéristiques de dispersion des sols.

Dans la première étape, on s'intéresse au paramètre local, c'est-à dire à la grandeur

résultant des mesures. On caractérise sa distribution par le calcul de la moyenne et la dispersion par l'écart-type et la variance.

Les corrélations indiquent le type relation existant entre les paramètres, plus le coefficient de corrélation s'approche de 1 ou -1, on dit qu'il existe une forte corrélation entre les paramètres et plus celui-ci s'approche de 0, on dit alors qu'il y a une faible corrélation entre les paramètres, lorsque la corrélation est positive on peut interpréter ceci par une relation proportionnelle entre les variables c'est-à-dire si l'une des variables augmente l'autre augmente également, et lorsque la corrélation est négative ceci indique qu'il existe une relation inverse entre les variables.

✓ Pour le sol argileux traité :

La moyenne : indique la distribution des paramètres étudiés, sachant que le sol est hétérogène et ses caractéristiques diffèrent d'un point à l'autre le calcul de la moyenne permet de quantifier les paramètres de chaque sondage en leur donnant une seule valeur moyenne.

L'écart-type et la variance : indiquent la dispersion des paramètres. Plus l'écart-type et la variance sont élevés plus on dit que les paramètres sont dispersés et vice versa.

Nous remarquons dans notre cas des différences de dispersion pour chaque paramètre ceci dit nous avons des paramètres plus dispersés que d'autres, c'est-à-dire des valeurs d'écart-type élevés pour les paramètres suivants :

- La teneur en eau " w "
- Le pourcentage de fine " FC "
- La limite de liquidité " Wl "
- L'indice de plasticité " Ip "
- L'indice de compression " Cc "
- L'indice de gonflement " Cg "
- La cohésion consolidée non drainée " C_{cu} "
- L'angle de frottement consolidé non drainé " Φ_{cu} "
- La contrainte de pré consolidation " σ'_p "

Alors que les écart-types sont presque nulles pour les paramètres suivants, ce qui indiquera une faible dispersion pour ses paramètres :

- La masse volumique sèche " ρ_d "
- Le degré de saturation " Sr "

- La masse volumique des grains solides " ρ_s "
- L'indice de consistance " I_c "

Les matrices de corrélation : Les relations entre les variables sont déterminées en prenant en considération leur coefficient de corrélation. Nous remarquons pour le cas de ce sol dans notre matrice de corrélation les chiffres en rouge indiquent une tendance vers l'unité c'est-à-dire une forte corrélation ; alors que pour les éléments en bleu qui indiquent une tendance au 0 qui veut dire une faible corrélation. Les éléments en noir sont des éléments ayant une corrélation normale.

Une forte corrélation indique qu'il existe une forte relation et dépendance entre les paramètres alors que les faibles corrélations indiquent une indépendance entre les paramètres.

Les histogrammes : L'histogramme, ou le diagramme, des fréquences donnent une idée sur la dispersion des données autour de la moyenne.

Les histogrammes que nous avons obtenus sont sous forme de bâtons. Les diagrammes représentent les effectifs c'est à-dire le nombre de sondages associés aux valeurs observées pour chaque sondage.

3. Conclusion :

De ce chapitre nous pouvons conclure que l'analyse statistique des données géotechniques repose sur les points essentiels suivants :

- Il faut connaître d'abord le type de variables étudiées (dépendantes, indépendantes).
- Prendre en compte la dispersion des paramètres du sol et ce en calculant l'écart-type qui permet de quantifier la dispersion et le fuseau d'incertitude. Plus les valeurs sont largement distribuées, plus l'écart-type est élevé, et l'écart-type est nul si toutes les valeurs sont les mêmes.
- Déterminer l'existence de relations entre les différents paramètres du sol, grâce au calcul des corrélations et celle-ci est une étape essentielle dans l'étude géotechnique.

Conclusion générale

Conclusion générale

Les paramètres géotechniques mesurés in situ et en laboratoire présentent une dispersion dans l'espace qui est à l'origine d'incertitudes sur les grandeurs représentatives de ces paramètres et sur la représentativité des résultats finaux des calculs géotechniques.

Outre l'analyse théorique et paramétrique menée dans les études de sites et d'ouvrages, les méthodes statistiques et probabilistes ont un apport considérable dans la compréhension de la géotechnique.

Afin de prendre en compte l'effet de la variabilité des propriétés physiques et mécaniques de sol dans l'analyse de problèmes de mécanique des sols, les géotechniciens poussent et testent leurs investigations dans l'application de techniques d'analyse diverses.

A travers ce travail de recherche nous avons traité la caractérisation de la variabilité naturelle des sols et des incertitudes liées aux reconnaissances géotechniques dans le but de mieux les prendre en compte dans l'évaluation des aléas géologiques. Pour cela les méthodes d'analyse statistiques en mécanique des sols ont montré que pour évaluer de façon acceptable les incertitudes, il faut tenir compte de cette variabilité spatiale du sol et pouvoir rassembler l'information nécessaire sur les sols.

D'une manière plus large, ce travail constitue une contribution à l'élaboration d'une méthodologie d'analyse des campagnes de reconnaissances géotechniques, en ayant le souci d'identifier, d'évaluer et de prendre en compte la variabilité et les incertitudes des données géotechniques pour permettre une meilleure maîtrise du risque d'origine géotechnique.

Finalement nous pouvons aboutir aux conclusions suivantes :

- L'analyse de la variabilité des propriétés physiques et mécaniques des sols consiste à étudier les lois de variations de chaque paramètre, les corrélations locales existant entre les paramètres deux à deux ainsi que la dispersion de chaque variable.
- Les données observées sont souvent imprécises et pourvues d'erreur et c'est pour cela qu'on a recours à l'analyse statistique.
- L'erreur humaine est la source essentielle des accidents d'ouvrages à quelque niveau que ce soit (conception, prise de données, calcul et analyse, réalisation).

Références bibliographiques

Références bibliographiques

1. **A.Dalaylan**, Septembre 2011 « Statistique Numérique et Analyse des données »
2. **Abdulbaki, Magnan J.P, Pouget.P** 1993 « Analyse probabiliste de la stabilité de deux remblais sur versant instable ». Laboratoire central des ponts et chaussées, Paris.
3. **Bellmelat**, 2019 « Etude des corrélations entre les paramètres physiques et mécaniques des sols de site de Tamda ». Mémoire master UMMT
4. **C.Hilldale**1971« A probabilistic approach to estimating differential settlement of footing on sand».Master of Science in civil engineering.Massachusetts Institute of Technology.
5. **F.Ayad** 2014 « Analyse fiabiliste du potentiel de liquéfaction des sols ». Thèse doctorat UABT
6. **F.Baguelin** , J.B. Kovarik, 2000 «Une méthode de détermination des valeurs caractéristiques des paramètres géotechniques ». Article
7. **F.Layati** 1999 « La fiabilité appliquée aux structures géotechniques ». Mémoire de fin d'étude UABT
8. **G.Matheron**. 1970 «Random Functions and their Application in Geology».Geostatistics.
9. **I.Megnounif** 2014 « Analyse des données géotechnique pour le dimensionnement des ouvrages cas de l'aéroport d'Alger ». Mémoire master UABT.
10. **J.P.Magnan** 1996« Les applications des statistiques et probabilités en géotechnique au LCPC »

11. **J.P.Magnan et A.Bouheraoua** 1996 « Analyse probabiliste de la consolidation unidimensionnelle des sols ». Laboratoire central des ponts et chaussées, Paris. France et Université de Tizi-Ouzou, Institut de Génie Civil, Algérie.
12. **J.P. Magnan et S.Baghery** 1982 « Etude probabiliste du comportement d'un remblai sur sols mous ». Laboratoire central des ponts et chaussées, Paris.
13. **K.Phoon et F.Kulhawy** 1999 « Characterization of geotechnical variability ». Canadian Geotechnical Journal.
14. **K.Polisano**. Cours de Statistiques. Licence. France. 2018.
15. **L.Boutonnier** 2007 « Comportement hydromécanique des sols fins proche de la saturation ». Thèse de doctorat, INP Grenoble, France
16. **Lumb, P.** 1966 « The variability of natural soils ». Canadian Geotechnical Journal.
17. **M.E.Harr**. 1987. « Reliability-based design in civil engineering ». McGraw-Hill Book Company, New York.
18. **M. Uzielli** « Analyse statistique des données géotechniques ». Georisk Engineering, Florence, Italie 2008
19. **S.Benhachilif** 2016 « Vers une mise en place d'une approche fiabiliste pour l'estimation du potentiel de liquéfaction ». Thèse doctorat UABT
20. **S.Lacasse, T.Guttormsen, F.Nadim, A.Rahim, Et T.Lunne**, 2007 « Utilisation de méthodes statistiques pour sélectionner les paramètres de conception du sol ». Actes de la 6^e Conférence internationale sur les enquêtes sur les sites offshore et la géotechnique, Londres, 11-13 septembre 2007. Londres: Société pour la technologie sous-marine.
21. **T.Boulefkhad** 1986 « Influence de la variabilité des propriétés des sols sur le calcul des tassements des fondations superficielles ». Thèse de doctorat en sciences appliquées.

22. Y.Houmadi 2004 « Modélisation stochastique de la variabilité spatiale des paramètres géotechniques ». Mémoire de magistère UABT

23. Y.Houmadi. 2011 « Prise en compte de la variabilité spatiale des paramètres géotechniques ». Thèse doctorat UABT

24. Y.Houmadi, A.Ahmed, A.Soubra 2012 « Analyse probabiliste d'un sol unidimensionnel problème de consolidation ». Article

Annexes

Annexes

- I. Annexe 1 : tableaux des sondages : (pièce jointe)
 II. Annexe 2 : tableaux des résultats statistiques :

✚ Sol 1 : Marne sableuse :

- i. Tableau des paramètres géotechniques.

	$\rho_d(\frac{t}{m^3})$	w(%)	Sr(%)	$\rho_s(\frac{t}{m^3})$	Fc(%)	Wl(%)	Ip	$\sigma'_p(\text{bar})$	Cc	Cg	Cuu(bar)	$\Phi_{uu}(^\circ)$	Ccu(bar)	$\Phi_{cu}(^\circ)$
Moy	1.633	20.955	87.97	1.972	67.069	49.20	23.22	1.895	0.067	0.0164	0.63	11.17	0.318	13.949
Max	2.006	26.62	108.8	2.268	89.2	77.64	38.36	2.5	0.1993	0.051	0.34	27.97	0.36	15
Méd	1.61	20.86	93.97	2.01	64.04	44.45	22.05	1.995	0.038	0.011	0.55	9.57	0.31	14.171
Ecart-type	0.195	4.413	20.20	0.194	16.895	16.89	9.813	0.591	0.0069	0.0204	0.345	9.99	0.03563	1.1560
Var	0.038	19.477	408.329	0.0379	283.448	285.4305	96.311	0.3502	0.00478	0.00041	0.11886	99.8059	0.00127	1.3364

- ii. Tableau de corrélation :

	ρ_d	w	Sr	ρ_s	Fc	Wl	Ip	σ'_p	Cc	Cg	Cuu	Φ_{uu}	Ccu	Φ_{cu}
ρ_d	1	-0.4942	0.7740	0.9390	0.1390	-0.4399	-0.4401	-0.5669	0.1919	0.1763	0.5860	0.4429	-0.9428	-0.5622
w	-0.4942	1	0.2376	-0.1686	0.1163	0.1566	0.1218	0.3869	0.3311	0.4487	-0.3220	0.1271	-0.3209	0.3098
Sr	0.7740	0.2376	1	0.9338	0.3084	-0.3820	-0.4166	-0.3793	0.5816	0.5850	0.4625	0.4375	-0.4972	0.4157
ρ_s	0.9390	-0.1686	0.9338	1	0.1913	-0.4997	-0.5169	-0.4793	0.2886	0.3153	0.5262	0.4588	-0.4773	-0.5102
Fc	0.1390	0.1163	0.3084	0.1913	1	0.2479	0.2673	0.0377	0.4137	0.7114	0.0182	-0.3534	0.1253	-0.6554
Wl	-0.4399	0.1566	-0.3820	-0.4997	0.2479	1	0.9734	-0.2720	-0.4581	-0.4334	-0.5597	-0.7660	-0.8554	0.9505
Ip	-0.4401	0.1218	-0.4166	-0.5169	0.2673	0.9734	1	-0.1678	-0.2779	-0.2910	-0.6528	-0.7628	-0.8649	0.9525
σ'_p	-0.5669	0.3869	-0.3793	-0.4793	0.0377	-0.2720	-0.1678	1	0.1402	0.0607	-0.5775	-0.2961	0.9826	-0.3204
Cc	0.1919	0.3311	0.5816	0.2886	0.4137	-0.4581	-0.2779	0.1402	1	0.9945	0.1556	0.7075	0.8219	0.9054

Cg	0.17 63	0.44 87	0.58 50	0.31 53	0.71 14	- 0.43 34	- 0.29 10	0.06 07	0.99 45	1	0.27 46	0.58 02	0.08 21	- 0.82 03
Cu u	0.58 60	- 0.32 20	0.46 25	0.52 62	0.01 82	- 0.55 97	- 0.65 28	- 0.57 75	0.15 56	0.27 46	1	0.40 94	- 0.23 61	- 0.24
Φu u	0.44 29	0.12 71	0.43 75	0.45 88	- 0.35 34	- 0.76 60	- 0.76 28	- 0.29 61	0.70 75	0.58 02	0.40 94	1	- 0.27 42	- 0.28 18
Cc u	- 0.94 28	- 0.32 09	- 0.49 72	- 0.47 73	0.12 53	- 0.85 54	- 0.864 9	0.98 26	0.82 19	0.08 21	- 0.23 61	- 0.27 42	1	- 0.47 58
Φc u	- 0.56 22	0.30 98	0.41 57	- 0.51 02	- 0.65 54	0.95 05	0.95 25	- 0.32 04	0.90 54	- 0.82 03	- 0.24	- 0.28 18	- 0.47 58	1

✚ Sol 2 : Argile plastique :

i. Tableau des données géotechnique

	$\rho_d \left(\frac{t}{m^3}\right)$	w(%)	Sr(%)	$\rho_s \left(\frac{t}{m^3}\right)$	Fc(%)	Wl(%)	Ip	σ'_p (bar)	Cc	Cg	Cuu(bar)	Φuu(°)
Moy	1.58	21.25	69.85	1.94	56.25	32.84	16.49	1.86	0.213 6	0.0 2	0.42	10.8
Max	1.59	22.1	72.6	1.35	93.1	41.4	22	1.86	0.213 6	0.0 2	0.42	10.8
Méd	1.59	21.25	69.85	1.94	49	34.5	18	1.86	0.213 6	0.0 2	0.42	10.8
Ecart- type	0.014 14	1.202 1	3.89	0.014 14	20.51	6.649	5.19	0	0	0	0	0
Var	0.002	1.445	15.12 5	0.000 2	420.8 6	44.20 55	29.93 55	0	0	0	0	0

ii. Tableau de corrélation.

	ρ_d	w	Sr	ρ_s	Fc	Wl	Ip	Ic	σ'_p	Cc	Cg	Ccu	Φcu
ρ_d	1	- 0.988 6	- 0.708 0	0.985 2	- 0.708 0	0.985 2	- 0.496 8	0.629 9	0.062 1	- 0.811 1	- 0.651 7	0.559 2	- 0.566 3
w	- 0.988 6	1	0.747 6	- 0.953 4	0.515 7	- 0.620 2	- 0.558 7	- 0.600 6	- 0.051 1	0.833 7	0.685 8	- 0.568 5	0.732 6
Sr	- 0.708 0	0.747 6	1	- 0.632 1	0.612 3	0.597 3	0.478 8	- 0.315 1	0.118 6	0.533 3	0.445 1	- 0.275 8	0.742 3
ρ_s	0.985 2	- 0.953 4	- 0.632 1	1	- 0.489 9	- 0.581 7	- 0.432 0	0.624 7	0.033 2	- 0.771 9	- 0.644 5	0.515 9	- 0.430 7
Fc	- 0.514 6	0.515 7	0.612 3	- 0.489 9	1	- 0.051 4	- 0.184 0	- 0.569 2	- 0.313 7	0.329 0	0.362 0	0.029 7	0.343 8
Wl	- 0.638 9	- 0.620 2	0.597 3	- 0.581 7	- 0.051 4	1	0.972 4	0.046 5	0.422 0	0.711 1	0.438 4	- 0.103 1	- 0.080 2

Ip	-0.4968	-0.5587	0.4788	-0.4320	-0.1840	0.9724	1	0.1056	0.4615	0.6990	0.4316	0.0026	-0.2353
ic	0.6299	-0.6006	-0.3151	0.6247	-0.5692	0.0465	0.1056	1	0.5469	-0.05837	-0.5979	0.2257	-0.2531
σ'_p	0.0621	-0.0511	0.1186	0.0332	-0.3137	0.4220	0.4615	0.5469	1	0.0274	0.1256	0.2438	-0.2230
Cc	-0.8111	0.8337	0.5333	-0.7719	0.3290	0.7111	0.6990	-0.05837	0.0274	1	0.8207	-0.0959	-0.2731
Cg	-0.6517	0.6858	0.4451	-0.6445	0.3620	0.4384	0.4316	-0.5979	0.1256	0.8207	1	-0.0303	0.5297
Ccu	0.5592	-0.5685	-0.2758	0.5159	0.0297	-0.1031	0.0026	0.2257	0.2438	-0.0959	-0.0303	1	-0.7353
Φ_{cu}	-0.5663	0.7326	0.7423	-0.4307	0.3438	-0.0802	-0.2353	-0.2531	-0.2230	-0.2731	0.5297	-0.7353	1

✚ Sol 3 : Terre organique.

i. Tableau des données géotechniques.

	$\rho_d \left(\frac{t}{m^3}\right)$	w(%)	Sr(%)	$\rho_s \left(\frac{t}{m^3}\right)$	Fc(%)	Wl(%)	Ip
Moy	1.758	17.3	88.3	2.062	93.8	49.5	24.9
Max	1.83	24	98	2.16	99	49.5	27.3
Méd	1.8	17.4	97	2.06	96	46.5	24.3
Ecart-type	0.086	5.74	18.37	0.073	6.76	2.55	1.85
Variance	0.00737	32.94	337.7	0.00532	45.7	6.5	3.425

ii. Tableau de corrélation

	ρ_d	w	Sr	ρ_s	Fc	Wl	Ip
ρ_d	1	-0.7900	-0.4250	0.3361	-0.4876	0.8338	0.7332
w	-0.7900	1	0.8839	0.3099	-0.0103	-0.7705	-0.7296
Sr	-0.4250	0.8839	1	0.6998	-0.2881	-0.4855	-0.4770
ρ_s	0.3361	0.3099	0.6998	1	0.7645	0.0806	-0.0111
Fc	-0.4876	-0.0103	-0.2881	0.7645	1	-0.1015	0.0182
Wl	0.8338	-0.7705	-0.4855	0.0806	-0.1015	1	0.9802
Ip	0.7332	-0.7296	-0.4770	-0.0111	0.0182	0.9802	1

✚ Sol 5 : argile sableuse.

i. Tableau des données :

	$\rho_d \left(\frac{t}{m^3}\right)$	w(%)	Sr(%)	$\rho_s \left(\frac{t}{m^3}\right)$	Fc(%)	Wl(%)	Ip	σ'_p (bar)	Cc	Cg	Cuu(bar)	Φ_{uu} (°)
Moy	1,81363636	17,8090909	95,4545455	2,13	74,8181818	49,6363636	28,0909091	2,58454545	0,12327273	0,03163636	0,405	20

Max	2,11	25,2	100	2,3	90	69	40	3,86	0,203	0,077	0,97	29
Méd	1,81	17,1	97	2,12	79	51	27	2,63	0,116	0,027	0,25	22
Ecart- type	0,154 22534	5,048 25803	4,156 04707	0,084 49852	15,36 11079	11,35 14116	7,313 74795	0,733 39435	0,037 88163	0,015 88252	0,289 62209	5,765 24893
Variance	0.004 44	28.92 277	15.18 916	0.015 9	2.256 133	2.697 033	0.941 2	1.123 1	0.006 1258	6.726 * 10 ⁻⁵	0.010 056	3.839 01667

ii. Tableau des corrélations :

	ρ_d	w	Sr	ρ_s	Fc	Wl	Ip	σ'_p	Cc	Cg	Cuu	Φ_{uu}
ρ_d	1	-0.797 4	-0.158 2	0.877 3	0.958 6	-0.055 7	0.706 1	0.979 8	0.886 4	0.609 0	0.186 9	-0.582 6
w	-0.797 4	1	0.925 5	-0.895 8	0.916 5	0.985 8	0.783 0	-0.977 4	-0.997 7	-0.876 6	0.497 7	0.697 8
Sr	-0.158 2	0.925 5	1	0.212 9	0.807 4	0.945 9	0.390 2	-1	1	1	-1	1
ρ_s	0.877 3	-0.895 8	0.212 9	1	0.984 9	0.071 7	0.790 5	0.999 9	0.961 9	0.757 5	0.037 7	-0.955 2
Fc	0.958 6	0.916 5	0.807 4	0.984 9	1	1	1	0	0	0	0	0
Wl	-0.055 7	0.985 8	0.945 9	0.071 7	1	1	0.667 6	1	-1	-1	1	-1
Ip	0.706 1	0.783 0	0.390 2	0.790 5	1	0.667 6	1	1	-1	-1	1	-1
σ'_p	0.979 8	-0.977 4	-1	0.999 9	0	1	1	1	-0.118 4	0.549 7	1	-1
Cc	0.886 4	-0.997 7	1	0.961 9	0	-1	-1	-0.118 4	1	0.664 5	-1	1
Cg	0.609 0	-0.876 6	1	0.757 5	0	-1	-1	0.549 7	0.664 5	1	-1	1
Cu	0.186 9	0.497 7	-1	0.037 7	0	1	1	1	-1	-1	1	-0.219 6
Φ_{uu}	-0.582 6	0.697 8	1	-0.955 2	0	-1	-1	-1	1	1	-0.219 6	1

 Sol 6 : Gravier.

i. Tableau des données géotechniques :

	Fc(%)
Moyenne	4.36667
Max	6.5
Médiane	4.4
Ecart-type	2.15
Variance	4.623333

ii. Tableau de corrélation :

	Fc
Fc	1

 Sol 7 : Gré.

i. Tableau des données géotechnique :

	$\rho_d \left(\frac{t}{m^3} \right)$	$w(\%)$	$\rho_s \left(\frac{t}{m^3} \right)$	Wl(%)	Ip
Moy	1.56	10.590991	1.72545	38.7090	20.9636
Max	1.62	16.2	1.88	48.5	26.3
Méd	1.56	9.2	1.72	38.3	21.7
Ecart-type	0.04312772	2.406430	0.07581077	4.9645	3.46850
Variance	0.00186	5.7909	0.005747	24.6469	12.03054

ii. Tableau de corrélation :

	ρ_d	w	ρ_s	Wl	Ip
ρ_d	1	0.6166	0.9206	0.5982	0.2700
w	0.6166	1	0.8734	0.8369	0.6975
ρ_s	0.9206	0.8734	1	0.7977	0.5260
Wl	0.5982	0.8369	0.7977	1	0.9042
Ip	0.2700	0.6975	0.5260	0.9042	1

 Sol 8 : Schiste.

i. Tableau des paramètres :

	$\rho_d \left(\frac{t}{m^3}\right)$	w(%)	Sr(%)	$\rho_s \left(\frac{t}{m^3}\right)$	Fc(%)	Wl(%)	Ip
Moy	1.51	29.5	100	2.35667	31.4133	47	19
Max	1.51	29.5	100	2.64	98.72	47	19
Méd	1.51	29.5	100	2.48	22	47	19
Ecart-type	0	0	0	0.361155	0.2733692	0	0
Variance	0	0	0	0.130433	747.3076	0	0

ii. Tableau de corrélation :

	ρ_d	w	Sr	ρ_s	Fc	Wl	Ip
ρ_d	1	0	0	0	0	0	0
w	0	1	0	0	0	0	0
Sr	0	0	1	0	0	0	0
ρ_s	0	0	0	1	0	0	0
Fc	0	0	0	0	1	0	0
Wl	0	0	0	0	0	1	0
Ip	0	0	0	0	0	0	1

✚ Sol 9 : Sable graveleux.

i. Tableau des paramètres géotechniques :

	Fc(%)
Moyenne	7.8
Max	9

Médiane	8
Ecart-type	0.83666
Variance	0.7

ii. Tableau des corrélations :

	Fc
Fc	1

✚ Sol 10 : Sable grossier.

i. Tableau des paramètres géotechniques :

	$\rho_d(\frac{t}{m^3})$	w(%)	Sr(%)	$\rho_s(\frac{t}{m^3})$	Fc(%)	Wl(%)	Ip
Moy	1,6335	14,306666 7	221,10666 7	2,58	27,669333 3	40,385	21,215
Max	2,305	17,43	265	2,65	94,55	41,12	22,75
Méd	1,375	14,98	252,08	2,63	16	40,385	21,215
Ecart-type	0,4327049 9	3,5087937 1	65,157462 6	0,1044030 7	28,465086 8	1,0394469 7	2,1708178 2
Variance	0.187233	2.311633	4245.4949	0.0109	810.26116 4	1.08045	4.71245

ii. Tableau des corrélations :

	ρ_d	w	Sr	ρ_s	Fc	Wl	Ip
ρ_d	1	0.2860	0.6787	0.6762	0.7214	0	0
w	0.2860	1	0.8978	0.8993	0.4409	0	0
Sr	0.6787	0.8978	1	0.9999	0.7911	0	0
ρ_s	0.6762	0.8993	0.9999	1	0.7890	0	0
Fc	0.7214	0.4409	0.7911	0.7890	1	1	-1
Wl	0	0	0	0	1	1	-1
Ip	0	0	0	0	-1	-1	1

✚ Sol 11 : limons argileux.

i. Tableau des données géotechniques :

	$\rho_d(\frac{t}{m})$	w(%)	Sr(%)	$\rho_s(\frac{t}{m})$	Fc(%)	Wl(%)	Ip	Ic	$\sigma'_p(\text{bar})$	Cc	Cg	Cu (bar)	$\Phi_u(^{\circ})$	Ccu (bar)	$\Phi_{cu} (^{\circ})$
Moy	1,738	18	88,7	2,079	70,0909091	40,9	20,5	1,026	2,15666667	0,14615	0,04268333	0,425	9	0,338	17,4
Max	1,86	22	100	2,14	98	45	23	1,21	3,07	0,1532	0,0598	0,44	10	0,66	22
Méd	1,76	17	90,5	2,079	70,0909091	40,9	20,5	1,026	2,15666667	0,14615	0,03855	0,425	9	0,23	17
Ecart - type	0,07955431	3,23178657	8,8950673	0,04383048	16,213911	3,57304725	1,8408935	0,21697926	0,64217339	0,005609545	0,01411204	0,0212132	1,41421356	0,21510463	3,64691651
Var	0,00632889	10,444444	79,122222	0,00192111	262,890909	12,7666667	3,3888889	0,04708	0,41238667	0,000031467	0,00019915	0,00045	2	0,04627	13,3

ii. Tableau des corrélations :

	ρ_d	w	Sr	ρ_s	Fc	Wl	Ip	Ic	σ'_p	Cc	Cg	Cuu	Φ_{uu}	Ccu	Φ_{cu}
ρ_d	1	-0.6050	-0.5567	0.0216	-0.1218	-0.0650	-0.1246	0.2380	0.2967	-0.5374	0.2638	-1	-1	0.2720	0.3482
w	-0.6050	1	0.8619	0.1961	0.2749	-0.2185	-0.2329	-0.9970	0.1566	0.0624	0.3876	-1	-1	0.3232	-0.4630
Sr	-0.5567	0.8619	1	0.5662	0.5092	-0.0830	0.0127	0.6365	0.6649	-0.1260	0.5360	-1	-1	-0.2458	-0.4404
ρ_s	0.0216	0.1961	0.5662	1	0.3237	0.5733	0.6668	0.2737	0.6482	-0.5055	0.6803	0	0	-0.2692	-0.4567
Fc	-0.1218	0.2769	0.5092	0.3237	1	-0.3167	-0.2268	0.3460	0.6960	-0.5907	0.2860	-1	-1	0.5063	0.3042
Wl	-0.0650	-0.2185	-0.0830	0.5733	-0.3167	1	0.9713	0.8392	-0.0450	-0.3298	0.3379	1	1	-0.7667	-0.7868
Ip	-0.1246	-0.2329	0.0127	0.6668	-0.2268	0.9713	1	0.7004	0.0952	-0.2864	0.2995	1	1	-0.76667	-0.7868
Ic	0.2380	-0.9970	-0.6365	0.2737	0.3460	0.8392	0.7004	1	-0.2141	-0.2919	-0.0772	1	1	0	0
σ'_p	0.2967	0.1566	0.6649	0.6482	0.6960	-0.0452	0.0952	-0.2141	1	-0.67	0.6294	-1	-1	0	0

						50		41		80					
Cc	-0.5374	0.0624	-0.1260	-0.5055	-0.5907	-0.3298	-0.2864	-0.2919	-0.6780	1	-0.7441	1	1	0	0
Cg	0.2638	0.3876	0.5360	0.6803	0.2860	0.3379	0.2995	-0.0772	0.6294	-0.7441	1	-1	-1	0	0
Cu	-1	-1	-1	0	-1	1	1	1	-1	1	-1	1	1	0	0
Φuu	-1	-1	-1	0	-1	1	1	1	-1	1	-1	1	1	0	0
Cc	0.2720	0.3232	-0.2458	-0.2692	0.5063	-0.7667	-0.76667	0	0	0	0	0	0	1	0.9605
Φc	0.3482	-0.4630	-0.4404	-0.4567	0.3042	-0.7868	-0.7868	0	0	0	0	0	0	0.9605	1

🚧 Sol 12 : limons sableux.

i. Tableau des paramètres géotechniques :

	ρ_d ($\frac{t}{m^3}$)	w (%)	Sr (%)	ρ_s ($\frac{t}{m^3}$)	Fc (%)	Wl (%)	Ip	Ic	σ'_p (bar)	Cc	Cg	Cu (bar)	Φu (°)	Ccu (bar)	Φc (°)
Mo	1,75	14,9516667	74,5833333	2,03	56,9555556	39,5	20,875	17	1,205	0,17721667	0,01726667	0,2	18,31	0,295	16,29
Ma	1,89	19,81	97	2,15	73,75	50	38	17	1,81	0,2458	0,0246	0,2	18,31	0,41	19,98
Mé	1,765	15	74,5	2,005	61,84	39,5	19,5	17	1,16	0,18435	0,0162	0,2	18,31	0,275	16,09
Eca	0,12149074	4,08734837	17,3217108	0,07823043	15,2496911	6,63324958	7,58640702	0	0,39672409	0,05937799	0,00443741	0	0	0,0888194	3,32948444
Var	0,01476	16,7064167	300,041667	0,00612	232,553078	44	57,5535714	0	0,15739	0,00352575	1,96907*	0	0	0,0079	11,0854667

ii. Tableau des corrélations :

	ρ_d	w	Sr	ρ_s	Fc	Wl	Ip	Ic	σ'_p	Cc	Cg	Cu	Φu	Ccu	Φc
ρ_d	1	-0.5074	0.0760	0.6544	-0.8361	-0.5118	-0.5971	0	-0.7652	-0.5803	-0.7937	0	0	0.9406	-0.1625

w	-0.5074	1	0.8156	0.2468	0.3201	-0.5072	-0.4217	0	0.7994	0.0419	0.9793	0	0	-0.3387	0.8635
Sr	0.0760	0.8156	1	0.7423	-0.2423	-0.7719	-0.6916	0	0.3536	-0.5578	0.5234	0	0	0.4193	0.9689
ρ_s	0.6544	0.2468	0.7423	1	-0.7543	-0.9889	-0.9889	0	-0.1550	-0.8829	-0.1777	0	0	0.9819	0.3645
Fc	-0.8361	0.3201	-0.2423	-0.7543	1	0.6908	0.6942	0	0.4805	0.4555	0.0666	0	0	-0.8110	0.6215
Wl	-0.5118	-0.5072	-0.7719	-0.9889	0.6908	1	0.8871	0	0.1399	0.0900	0.8708	0	0	-0.8893	0.5903
Ip	-0.5971	-0.4217	-0.6916	-0.9889	0.6942	0.8871	1	0	0.0379	0.2708	-0.9461	0	0	-0.9818	0.2990
Ic	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
σ'_p	-0.7652	0.7994	0.3536	-0.1550	0.4805	0.1399	0.0379	0	1	-0.1041	0.4835	0	0	-1	1
Cc	-0.5803	0.0419	-0.5578	-0.8829	0.4555	0.0900	0.2708	0	-0.1041	1	0.4779	0	0	1	-1
Cg	-0.7937	0.9793	0.5234	-0.1777	0.0666	0.8708	-0.9461	0	0.4835	0.4779	1	0	0	1	-1
Cu	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
Φ_u	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
Ccu	0.9406	-0.3387	0.4193	0.9819	-0.8110	-0.8893	-0.9818	0	-1	1	1	0	0	1	-0.3142
Φ_c	-0.1625	0.8635	0.9689	0.3645	0.6215	0.5903	0.2990	0	1	-1	-1	0	0	-0.3142	1

✚ Sol 13 : Remblai.

Tableau des paramètres géotechniques :

	$\rho_d \left(\frac{t}{m^3} \right)$	w(%)	Sr(%)	$\rho_s \left(\frac{t}{m^3} \right)$	Fc(%)	Wl(%)	Ip	σ'_p (bar)	Cc	Cg	Ccu(bar)	Φ_{uu} (°)
Moy	1,75	14,5	72	1,995	13,06	32	16,4	1,34	0,17	0,01	0,52	16,88
Max	1,75	14,5	72	2	37,14	32	16,4	1,34	0,17	0,01	0,52	16,88

Méd	1,75	14,5	72	1,99	11,25	32	16,4	1,34	0,1751	0,018	0,52	16,88
Ecart-type	0	0	0	0	9,06	0	0	0	0	0	0	0
Var	0	0	0	5* 10 ⁻⁵	82,258 24	0	0	0	0	0	0	0

ii. Tableau des corrélations :

	ρ_d	w	Sr	ρ_s	Fc	Wl	Ip	σ'_p	Cc	Cg	Cuu	Φ_{uu}
ρ_d	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
w	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Sr	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ρ_s	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
Fc	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
Wl	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
Ip	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
σ'_p	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
Cc	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
Cg	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
Cuu	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
Φ_{uu}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1

🚧 Sol 14 : sable argileux.

iii. Tableau des paramètres géotechniques :

	ρ_d ($\frac{t}{m^3}$)	w (%)	Sr (%)	ρ_s ($\frac{t}{m^3}$)	Fc (%)	Wl (%)	Ip	Ic	σ'_p (bar)	Cc	Cg	Cu u (bar)	Φ_u (°)	Ccu (bar)	Φ_c (°)
Mo	1,76	14,1	63,8	2,01	37,3	41,1	23,6	1,19	2,29	0,15	0,02	0,27	15,6	0,24	23
y	363	1	333	636	75	666	666	666	5	81	88	5	183		
	636		333	364		667	667	667					333		
Ma	1,94	21,6	95	2,17	71	54	31	1,34	3,66	0,19	0,04	0,37	16,8	0,24	23
x		1								32	26		6		
Mé	1,75	14,5	54	2,01	34	37,5	22	1,21	2,29	0,15	0,02	0,25	15,7	0,24	23
d									5	81	88	5	85		

Ecart-typ e	0,08 778 072	3,53 898 29	18,4 831 004	0,08 558 887	14,5 301 411	11,4 491 63	6,65 832 812	0,15 044 379	1,93 040 151	0,04 963 89	0,01 951 615	0,05 009 99	1,11 773 73	0	0
Var	0,00 770 5 45	12,5 244	341, 625	0,00 732 545	211, 125	131, 083 333	44,3 333 333	0,02 263 333	3,72 645	0,00 246 402	0,00 038 088	0,00 251	1,24 933 667	0	0

iv. Tableau des corrélations :

	ρ_d	w	Sr	ρ_s	Fc	Wl	Ip	Ic	σ'_p	Cc	Cg	Cuu	Φ_{uu}	Ccu	Φ_{cu}
ρ_d	1	-0.55 44	0.20 79	0.79 25	0.19 84	-0.58 97	-0.53 80	0.96 87	1	-1	-1	0.34 30	0.06 61	0	0
w	-0.55 44	1	0.50 60	0.06 45	0.63 96	0.92 60	0.90 06	-0.95 46	-1	1	1	-0.40 08	-0.17 70	0	0
Sr	0.20 79	0.50 60	1	0.60 39	0.63 60	0	0	0	-1	1	1	-0.34 77	-0.23 24	0	0
ρ_s	0.79 25	0.06 45	0.60 39	1	0.49 02	0.48 44	0.53 81	0.18 25	1	-1	-1	0.28 10	-0.20 92	0	0
Fc	0.19 84	0.63 96	0.63 60	0.49 02	1	0	0	0	0	0	0	0.79 94	-0.72 17	0	0
Wl	-0.58 97	0.92 60	0	0.48 44	0	1	0.99 80	-0.77 16	0	0	0	0	0	0	0
Ip	-0.53 80	0.90 06	0	0.53 81	0	0.99 80	1	-0.73 04	0	0	0	0	0	0	0
Ic	0.96 87	-0.95 46	0	0.18 25	0	-0.77 16	-0.73 04	1	0	0	0	0	0	0	0
σ'_p	1	-1	-1	1	0	0	0	0	1	-1	-1	0	0	0	0
Cc	-1	1	1	-1	0	0	0	0	-1	1	1	0	0	0	0
Cg	-1	1	1	-1	0	0	0	0	-1	1	1	0	0	0	0
Cuu	0.34 30	-0.40 08	-0.34 77	0.28 10	0.79 94	0	0	0	0	0	0	1	-0.66 91	0	0
Φ_{uu}	0.06 61	-0.17 70	-0.23 24	-0.20 92	-0.72 17	0	0	0	0	0	0	-0.66 91	1	0	0
Ccu	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
Φ_{cu}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1

✚ Sol 15 : sable limoneux.

i. Tableau des paramètres géotechniques :

	$\rho_d \left(\frac{t}{m^3} \right)$	w(%)	Sr(%)	$\rho_s \left(\frac{t}{m^3} \right)$	Fc(%)	Ccu (bar)	$\Phi_{cu} (^\circ)$
--	---------------------------------------	------	-------	---------------------------------------	-------	-----------	----------------------

Moyenne	1,63090909	7,93636364	29,3636364	1,75818182	26,2727273	0,18727273	22,5518182
Max	1,68	9,5	35	1,8	33	0,26	25,1
Médiane	1,64	7,6	28	1,76	26	0,18	22,68
Ecart-type	0,03080732	0,7242551	2,69342634	0,02857208	3,90104881	0,04451762	2,08327539
Variance	0,00094909	0,52454545	7,25454545	0,00081636	15,2181818	0,00198182	4,34003636

ii. Tableau des corrélations :

	ρ_d	w	Sr	ρ_s	Fc	Ccu	Φ_{cu}
ρ_d	1	-0.5080	-0.5225	0.9336	-0.0937	-0.4537	0.2578
w	-0.5080	1	0.9972	-0.1801	-0.2785	0.1522	0.0263
Sr	-0.5225	0.9972	1	-0.1984	-0.2959	0.1925	-0.0249
ρ_s	0.9336	-0.1801	-0.1984	1	-0.2193	0.4288	0.3093
Fc	-0.0937	-0.2785	-0.2959	-0.2193	1	-0.2544	0.4820
Ccu	-0.4537	0.1522	0.1925	-0.4288	-0.2544	1	-0.7606
Φ_{cu}	0.2578	0.0263	-0.0249	0.3093	0.4820	-0.7606	1

 Sol 16 : limons.

i. Tableau des paramètres géotechniques :

	$\rho_d(\frac{t}{m^3})$	$w(\%)$	$Sr(\%)$	$\rho_s(\frac{t}{m^3})$	$Fc(\%)$	$Wl(\%)$	Ip	$\sigma'_p(\text{bar})$	Cc	Cg	$Cuu(\text{bar})$	$\Phi_{uu}(^\circ)$
Moy	1,598 3636 4	19,36 3636 4	94,72 7272 7	1,907 2727 3	98,90 9090 9	45,72 7272 7	24,27 2727 3	1,735 4545 5	0,235 1272 7	0,036 0363 64	0,275 4545 5	7,970 9090 9
Max	1,667	25	100	2	100	47	26	1,82	0,257 3	0,042 2	0,3	9,93
Méd	1,602	19	95	1,9	99	46	24	1,73	0,232 5	0,036 2	0,28	8
Ecart-type	0,040 9372	2,248 2316 3	3,101 3193 7	0,041 0099 8	0,700 6490 5	0,904 5340 3	1,190 8743 9	0,048 4486 6	0,012 8499 1	0,003 7194 82	0,015 7249 1	1,288 5143

Var	0,001 6758 5	5,054 5454 5	9,618 1818 2	0,001 6818 2	0,490 9090 9	0,818 1818 2	1,418 1818 2	0,002 3472 7	0,000 1651 2	1,383 45* 10 ⁻⁵	0,000 2472 7	1,660 2690 9
------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	----------------------------------	--------------------	--------------------

ii. Tableau des corrélations :

	ρ_d	w	Sr	ρ_s	Fc	Wl	Ip	σ'_p	Cc	Cg	Cuu	Φ_{uu}
ρ_d	1	- 0.569 8	- 0.548 9	0.709 4	- 0.134 7	0.200 0	- 0.092 4	- 0.506 8	0.367 0	- 0.077 5	- 0.386 5	- 0.630 2
w	- 0.569 8	1	0.861 8	0.174 5	0.086 5	0.201 1	- 0.152 7	0.374 7	0.304 2	0.122 6	0.051 4	0.241 5
Sr	- 0.548 9	0.861 8	1	0.087 9	0.125 5	0.362 9	- 0.140 3	0.609 8	0.462 9	0.416 1	0.156 5	0.315 1
ρ_s	0.709 4	0.174 5	0.087 9	1	- 0.079 0	0.409 2	- 0.249 4	- 0.278 6	0.706 2	0.029 5	0.506 0	- 0.544 2
Fc	- 0.134 7	0.086 5	0.125 5	- 0.079 0	1	0.272 5	0.152 5	0.602 5	- 0.190 7	0.035 9	- 0.132 0	0.323 5
Wl	0.200 0	0.201 1	0.362 9	0.409 2	0.272 5	1	0.075 9	0.379 6	0.321 6	0.101 3	0.396 2	- 0.321 5
Ip	- 0.092 4	- 0.152 7	- 0.140 3	- 0.249 4	0.152 5	0.075 9	1	0.370 2	0.044 5	- 0.704 5	- 0.461 1	0.283 9
σ'_p	- 0.506 8	0.374 7	0.609 8	- 0.278 6	0.602 5	0.379 6	0.370 2	1	0.108 1	0.074 8	- 0.305 4	0.677 8
Cc	0.367 0	0.304 2	0.462 9	0.706 2	- 0.190 7	0.321 6	0.044 5	0.108 1	1	0.168 9	0.429 7	- 0.158 9
Cg	- 0.077 5	0.122 6	0.416 1	0.029 5	0.035 9	0.101 3	- 0.704 5	0.074 8	0.168 9	1	0.380 9	- 0.165 3
Cuu	- 0.386 5	0.051 4	0.156 5	0.506 0	- 0.132 0	0.396 2	- 0.461 1	- 0.305 4	0.429 7	0.380 9	1	- 0.490 3
Φ_{uu}	- 0.630 2	0.241 5	0.315 1	- 0.544 2	0.323 5	- 0.321 5	0.283 9	0.677 8	- 0.158 9	- 0.165 3	- 0.490 3	1

✚ Sol 17 : marne.

i. Tableau des paramètres géotechniques :

	$\rho_d(\frac{t}{m^3})$	w(%)	Sr(%)	$\rho_s(\frac{t}{m^3})$	Fc(%)	Wl(%)	Ip	Ic	σ'_p (bar)	Cc	Cg	Cuu(bar)	Φ_{uu} (°)	Cc u (bar)	Φ_{cu} (°)	Cc d (bar)	Φ_{cd} (°)
--	-------------------------	------	-------	-------------------------	-------	-------	----	----	-------------------	----	----	----------	-----------------	------------------	-----------------	------------------	-----------------

Mo y	1,6 51	21, 87	93, 4	2,0 12	88	78, 444 444 4	45, 666 666 7	19, 4	3,1 771 428 6	0,1 889 428 6	0,0 561 714 3	0,7 3	19	0,5 733 333 3	21, 59	0,2 8	16, 666 666 7
Ma x	1,8 3	27	100	2,1 6	97	97	63	32	4,4 9	0,2 56	0,0 9	0,7 3	19	1,1 8	25	0,3 3	19
Mé d	1,6 1	22, 5	98	2,0 05	95	81	45	22	3,4 5	0,1 827	0,0 565	0,7 3	19	0,2 9	22	0,2 8	16
Ec art - typ e	0,0 945 692	4,1 177 259 1	11, 037 310 5	0,0 792 744 9	13, 892 444	15, 042 532 3	10, 404 326	10, 920 976 4	1,1 267 758 5	0,0 495 671 2	0,0 247 989 1	0	0	0,5 257 692 8	3,6 323 959	0,0 5	2,0 816 66
Va r	0,0 089 433 3	16, 955 666 7	121 ,82 222 2	0,0 062 844 4	193	226 ,27 777 8	108 ,25	119 ,26 772 5	1,2 696 238 1	0,0 024 569	0,0 006 149 9	0	0	0,2 764 333 3	13, 194 3	0,0 025	4,3 333 333 3

ii. Tableau des corrélations :

	ρ_d	w	Sr	ρ_s	Fc	Wl	Ip	Ic	σ'_p	Cc	Cg	Cu	Φ_u	Ce	Φ_c	Cc d	Φ_c d
ρ_d	1	- 0.7 175	- 0.0 312	0.8 286	- 0.7 017	- 0.6 279	- 0.5 380	- 0.4 365	0.4 583	- 0.9 425	0.9 104	0	0	0.8 173	0.9 989	- 0.6 546	- 0.8 91 0
w	- 0.7 175	1	0.6 303	- 0.2 111	- 0.3 097	0.9 442	0.9 300	0.8 873	- 0.4 435	0.3 068	0.3 561	0	0	0.1 043	- 0.5 269	0.7 559	0.8 17 0
Sr	- 0.0 312	0.6 303	1	0.4 815	- 0.9 839	0.7 879	0.8 337	0.9 478	0.0 569	- 0.3 152	- 0.2 303	0	0	0.6 960	0.1 100	- 0.9 819	- 0.4 19 3
ρ_s	0.8 286	- 0.2 111	0.4 815	1	- 0.8 228	0.0 290	0.1 372	0.2 523	0.3 035	- 0.9 425	0.8 593	0	0	0.9 990	0.7 623	0.8 660	0.6 93 3
Fc	- 0.7 017	- 0.3 097	- 0.9 839	- 0.8 228	1	1	1	-1	0.6 342	0.7 644	0.6 110	0	0	-1	-1	0	0
Wl	- 0.6 279	0.9 442	0.7 879	0.0 290	1	1	0.9 051	0.9 009	- 0.2 436	0.0 467	0.2 255	0	0	1	-1	0.0 524	0.9 81 9
Ip	- 0.5 380	0.9 300	0.8 337	0.1 372	1	0.9 051	1	0.9 411	- 0.3 887	- 0.0 605	- 0.0 405	0	0	1	-1	0.1 555	0.9 96 2
Ic	- 0.4 365	0.8 873	0.9 478	0.2 523	-1	0.9 009	0.9 411	1	- 0.3 384	- 0.0 786	- 0.1 109	0	0	1	-1	0.1 555	0.9 96 2
σ'_p	0.4 583	- 0.4 435	0.0 569	0.3 035	0.6 342	- 0.2 436	- 0.3 887	- 0.3 384	1	- 0.3 470	- 0.1 454	0	0	0.5 305	0.9 386	0	0

Cc	-0.9425	0.3068	-0.3152	-0.9425	0.7644	0.0467	-0.0605	-0.0786	-0.3470	1	0.8775	0	0	-0.8885	-0.9832	0	0
Cg	0.9104	0.3561	-0.2303	0.8593	0.6110	0.2255	-0.0405	-0.1109	-0.1454	0.8775	1	0	0	-0.0764	0.5505	0	0
Cu	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
Φuu	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
Cc	0.8173	0.1043	0.6960	0.9990	-1	1	1	1	0.5305	-0.8885	-0.0764	0	0	1	0.7920	0	0
Φc	0.9989	-0.5269	0.1100	0.7623	-1	-1	-1	-1	0.9386	-0.9832	0.5505	0	0	0.7902	1	0	0
Cc	-0.6546	0.7559	-0.9819	0.8660	0	0.0524	0.1555	0.1555	0	0	0	0	0	0	0	1	0.2401
Φc	-0.8910	0.8170	-0.4193	0.6933	0	0.9819	0.9962	0.9962	0	0	0	0	0	0	0	0.2401	1

✚ Sol 18 : sable.

i. Tableau des paramètres géotechniques :

	$\rho_d \left(\frac{t}{m^3}\right)$	w(%)	Sr(%)	$\rho_s \left(\frac{t}{m^3}\right)$	Fc(%)	Wl(%)	Ip	Cuu(bar)	Φuu(°)
Moy	1,62142857	10,0142857	35,3857143	1,95571429	30,6357143	33	17,2	0,144	20,7
Max	1,65	11,5	40,1	2	42,5	39,5	21	0,144	20,7
Méd	1,64	10,2	35,4	1,95	40,3	33	17,2	0,14	20,2
Ecart-type	0,04140393	0,99904717	3,50591337	0,03779645	16,023699	9,19238816	5,37401154	0,0167332	1,16619038
Varianc	0,00171429	0,99809524	12,2914286	0,00142857	256,758929	84,5	28,88	0,00028	1,36

ii. Tableau des corrélations :

	ρ_d	w	Sr	ρ_s	Fc	Wl	Ip	Cuu	Φuu
ρ_d	1	0.2089	0.4778	0.6648	-0.5978	0	0	-0.7627	0.1391
w	0.2089	1	0.2099	0.5977	-0.2635	0	0	-0.1026	-0.0887
Sr	0.4778	0.2099	1	0.1994	-0.4656	0	0	-0.7792	0.9007
ρ_s	0.6648	0.5977	0.1994	1	0.8901	0	0	-0.5384	-0.1469
Fc	-0.5978	-0.2635	-0.4656	0.8901	1	1	1	0.9853	-0.7177

Wl	0	0	0	0	1	1	1	0	0
Ip	0	0	0	0	1	1	1	0	0
Cuu	-0.7627	-0.1026	-0.7792	-0.5384	0.9853	0	0	1	0.6277
Φuu	0.1391	-0.0887	0.9007	-0.1469	-0.7177	0	0	-0.6277	1

✚ Sol 19 : Sable fin.

i. Tableau des paramètres géotechniques :

	Fc(%)	Wl(%)	Ip	$\sigma'_p(\text{bar})$	Cc	Cg
Moy	9,66	24,7	13,8	2,59	0,1589	0,0336
Max	50	24,7	13,8	2,59	0,1589	0,0336
Méd	7	24,7	13,8	2,59	0,1589	0,0336
Ecart-type	14,6393837	0	0	0	0	0
Variance	214,311556	0	0	0	0	0

ii. Tableau des corrélations :

	Fc	Wl	Ip	σ'_p	Cc	Cg
Fc	1	0	0	0	0	0
Wl	0	1	0	0	0	0
Ip	0	0	1	0	0	0
σ'_p	0	0	0	1	0	0
Cc	0	0	0	0	1	0
Cg	0	0	0	0	0	1

✚ Sol 20 : Silitite

i. Tableau des paramètres géotechniques :

	$\rho_d(\frac{t}{m^3})$	w(%)	Sr(%)	$\rho_s(\frac{t}{m^3})$	Fc(%)	Wl(%)	Ip
Moy	1,6954545 5	22,866666 7	100	2,09	75,278	49,54	24,042
Max	1,97	25,27	100	2,17	99,2	73	35,52
Méd	1,71	22,47	100	2,1	79,49	46,4	21,25

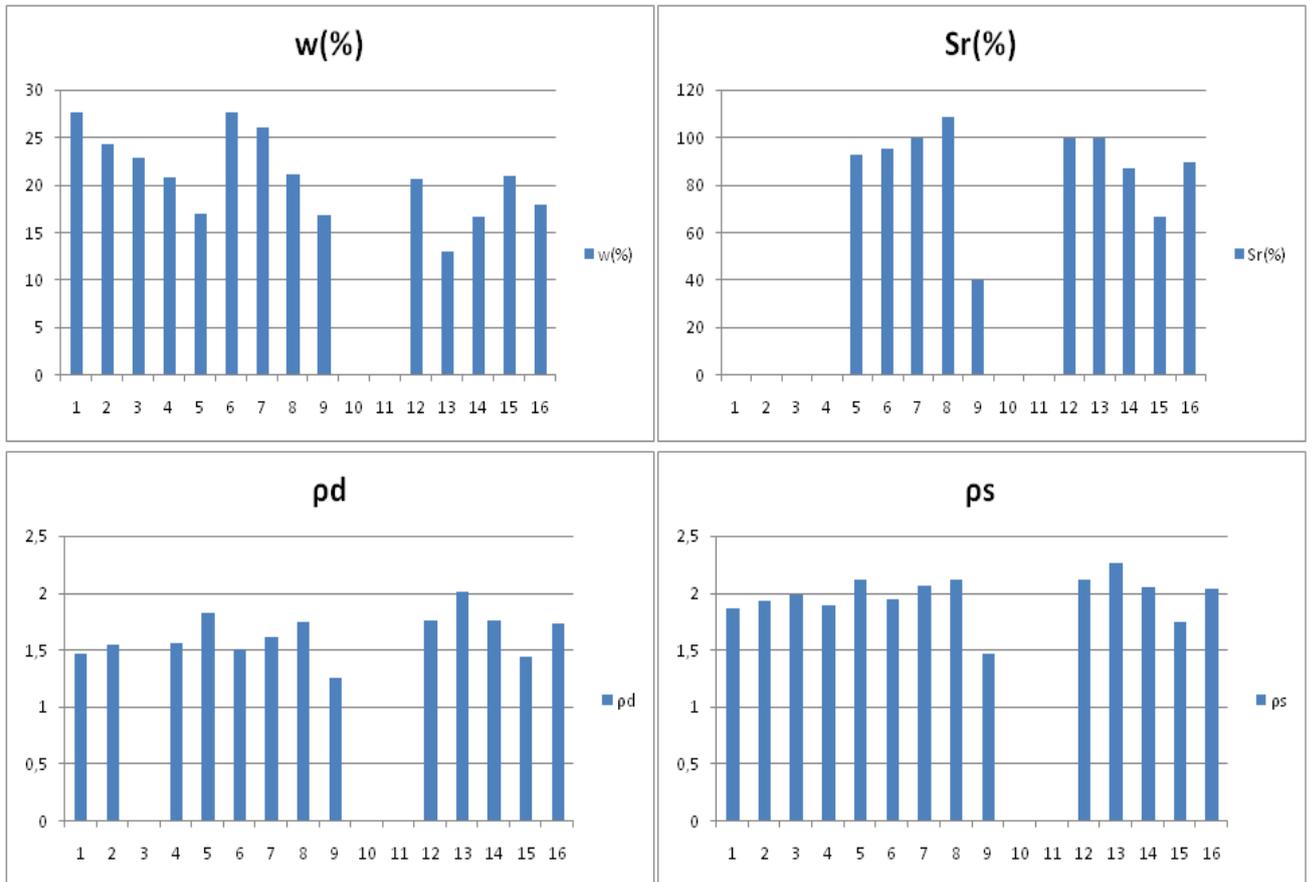
Ecart-type	0,1627491 1	2,2315988 3	0	0,0748331 5	20,543471 4	16,016255 6	7,9708312 7
Variance	0,0264872 7	4,9800333 3	0	0,0056	422,03421 8	256,52044 4	63,534151 1

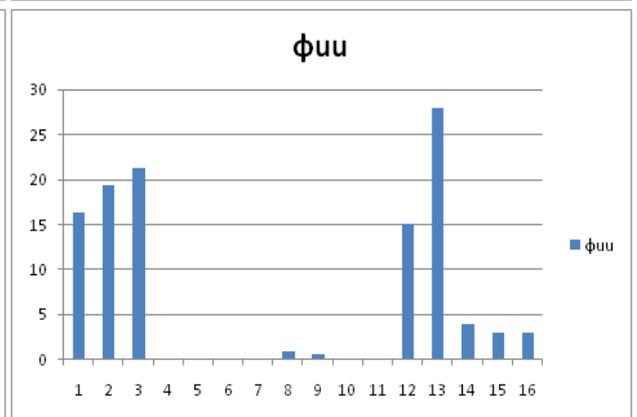
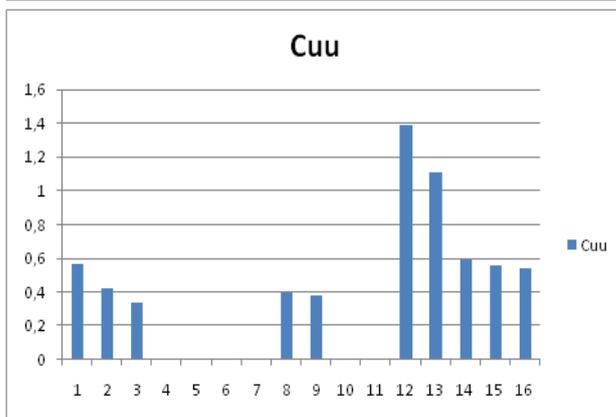
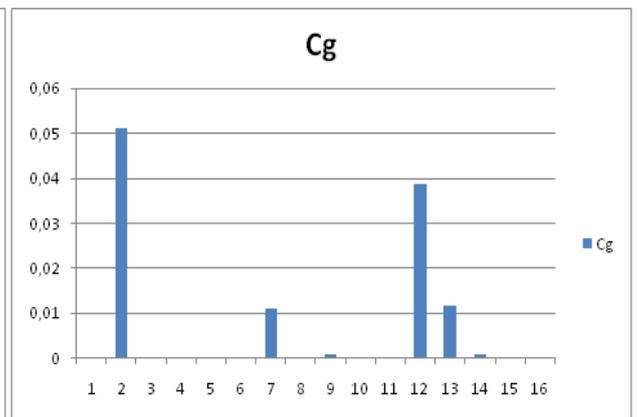
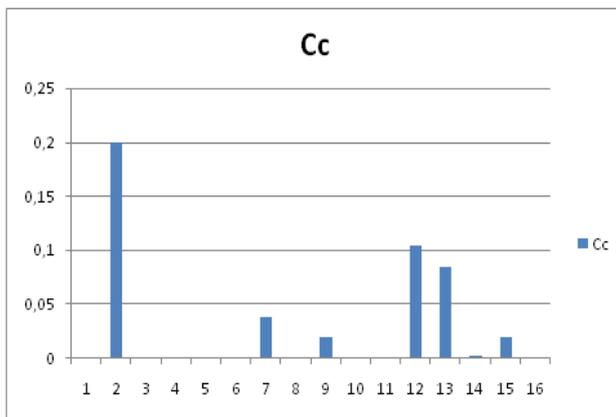
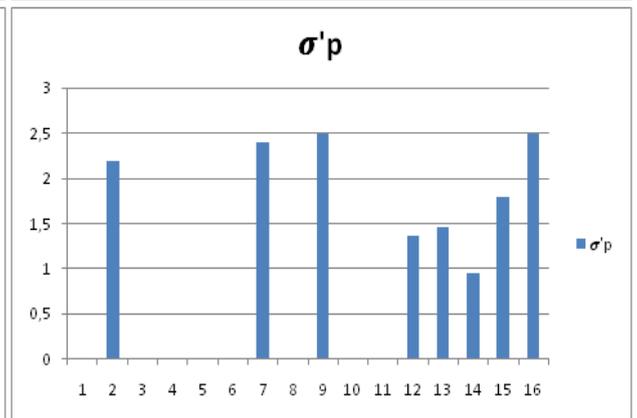
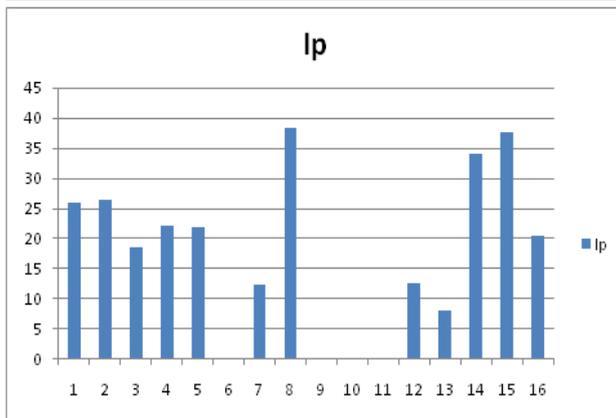
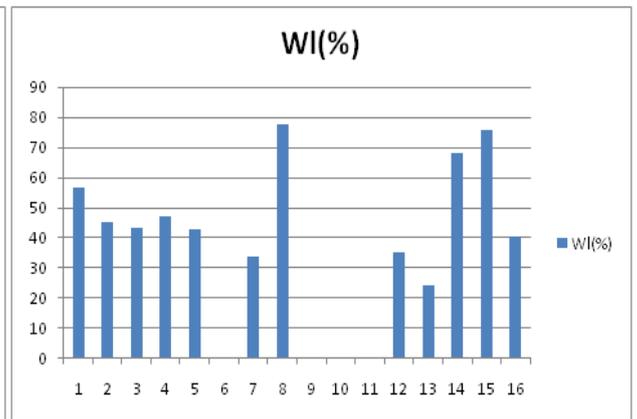
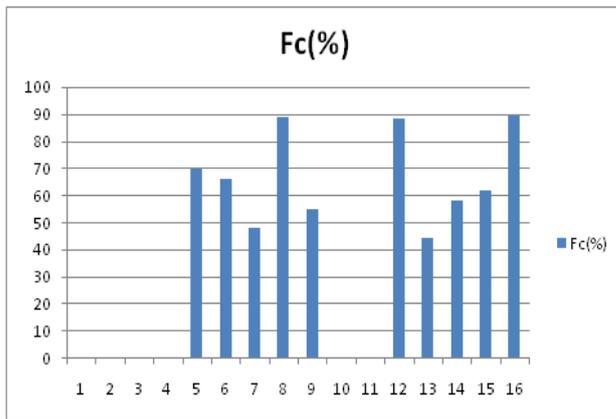
ii. Tableau des corrélations :

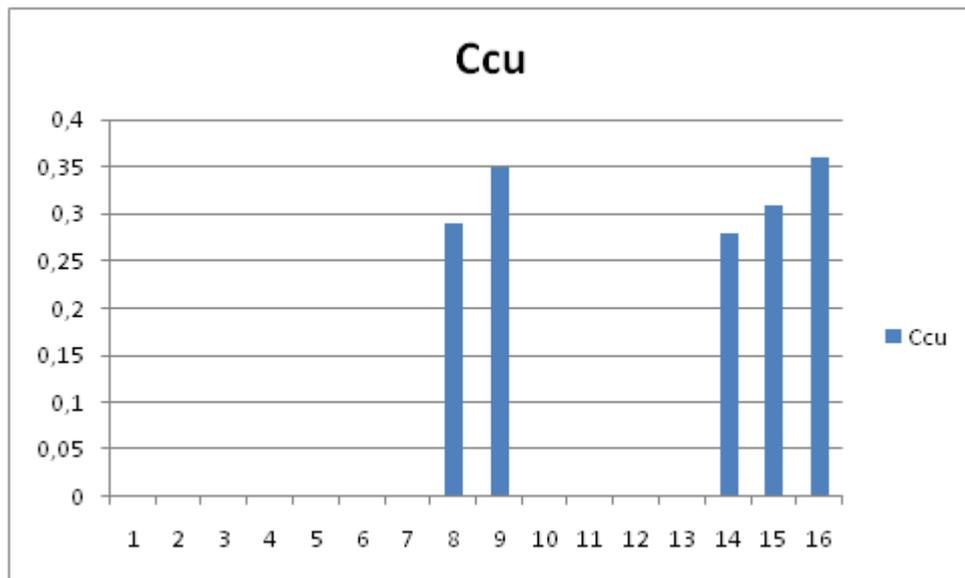
	ρ_d	w	Sr	ρ_s	Fc	Wl	Ip
ρ_d	1	-0.2237	0	0.9125	0.5049	-0.0384	0.0254
w	-0.2237	1	0	-0.9326	-1	1	1
Sr	0	0	1	0	0	0	0
ρ_s	0.9125	-0.9326	0	1	0.0379	-0.1667	-0.0467
Fc	0.5049	-1	0	0.0379	1	0.8538	0.8731
Wl	-0.0384	1	0	-0.1667	0.8538	1	0.9830
Ip	0.0254	1	0	-0.0467	0.8731	0.9830	1

III. Annexe 3 : histogrammes des fréquences :

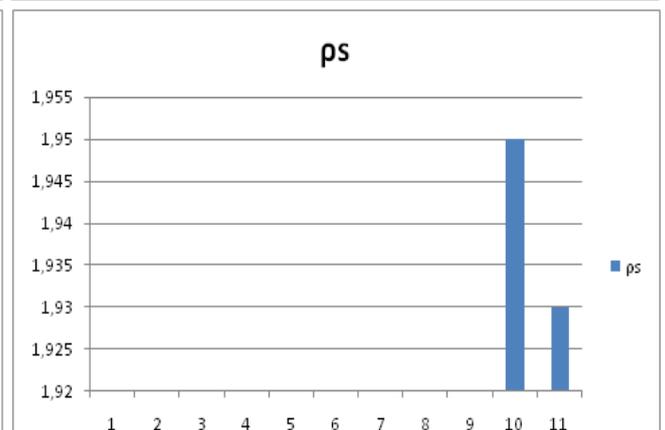
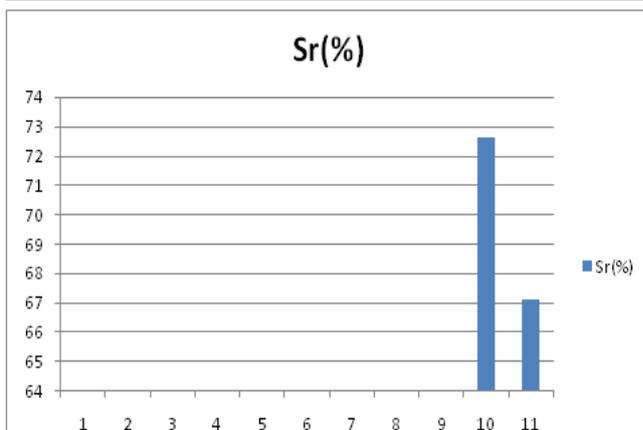
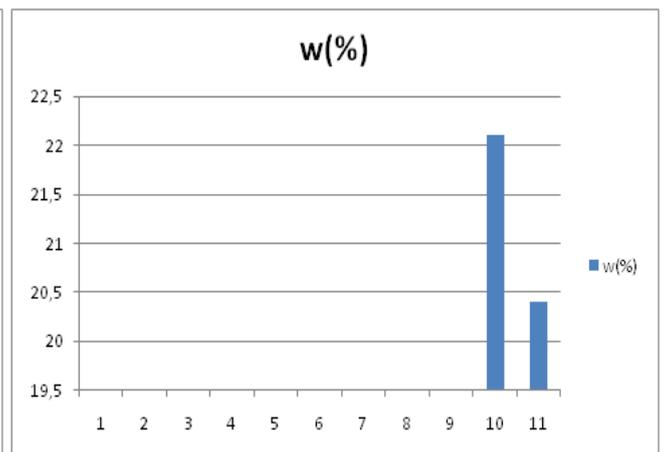
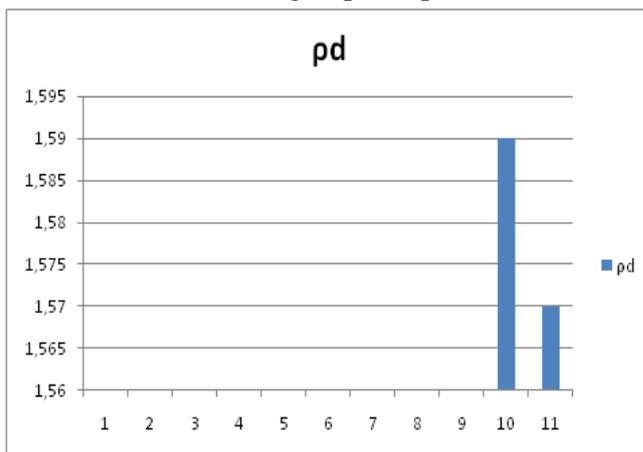
- Sol 1 : Marne sableuse :

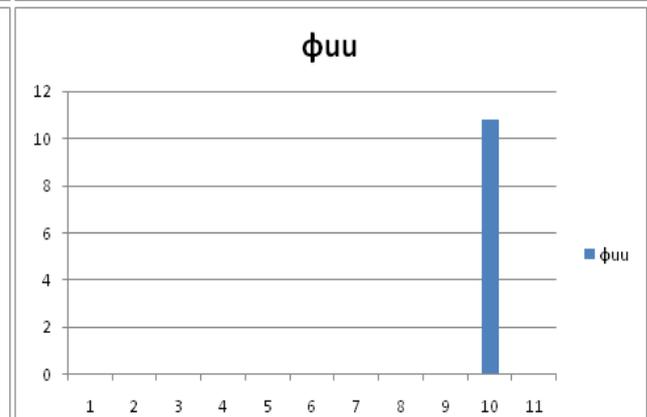
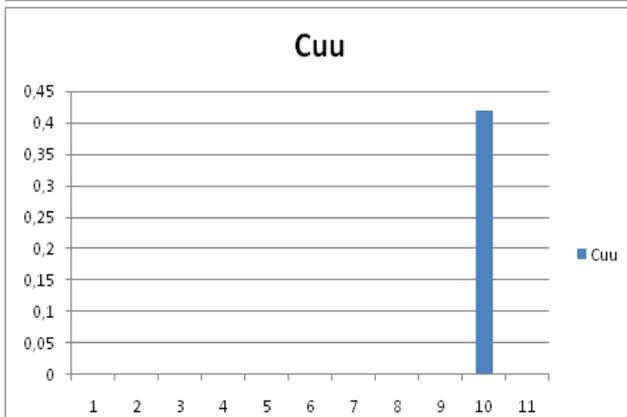
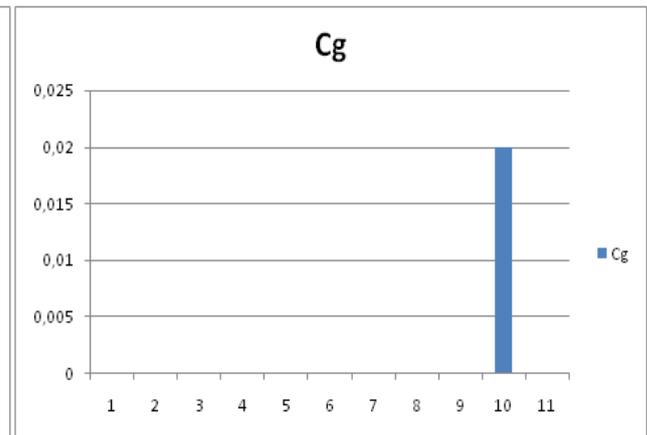
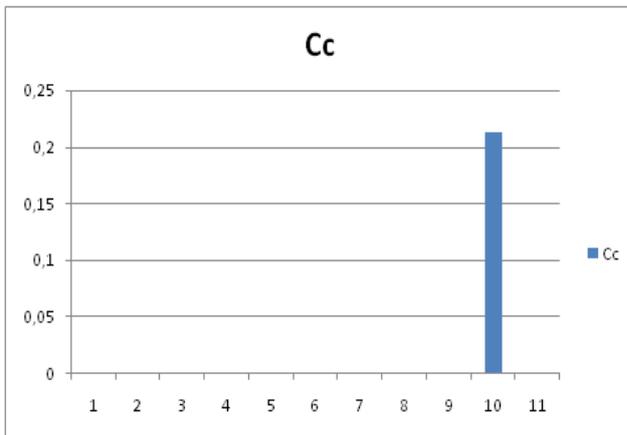
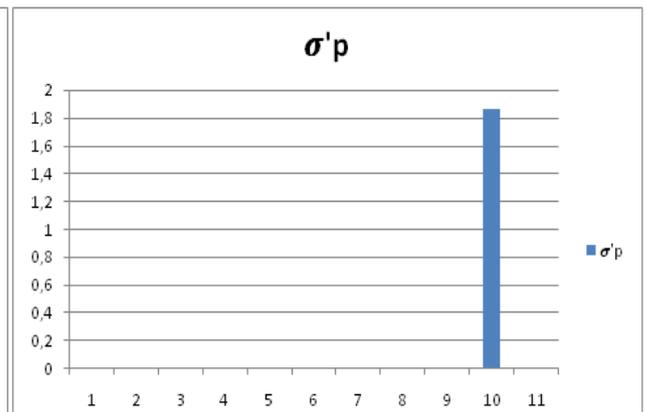
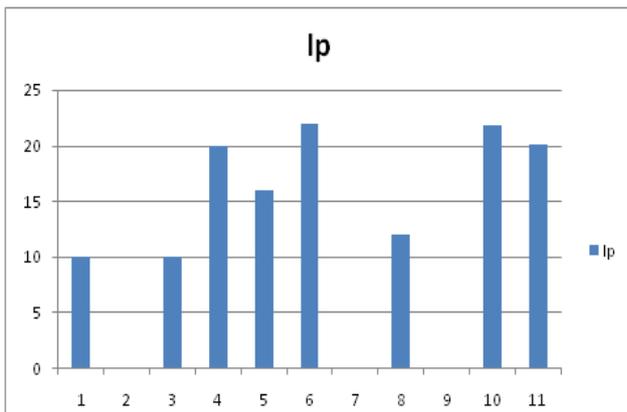
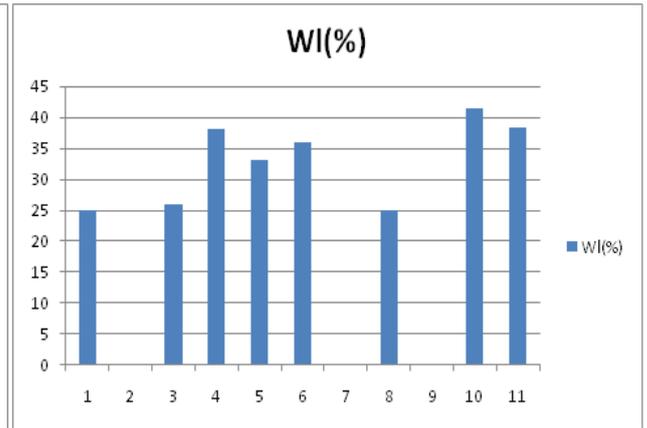
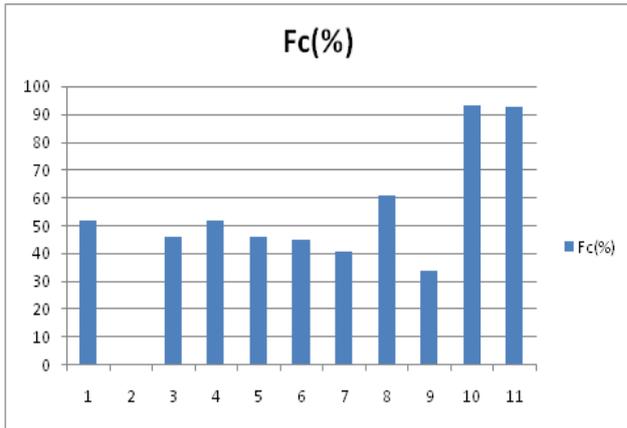




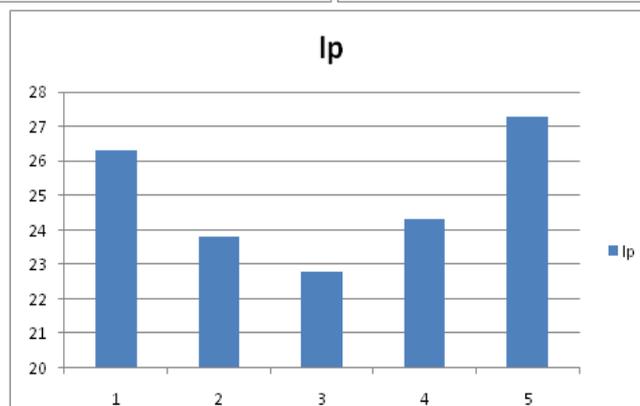
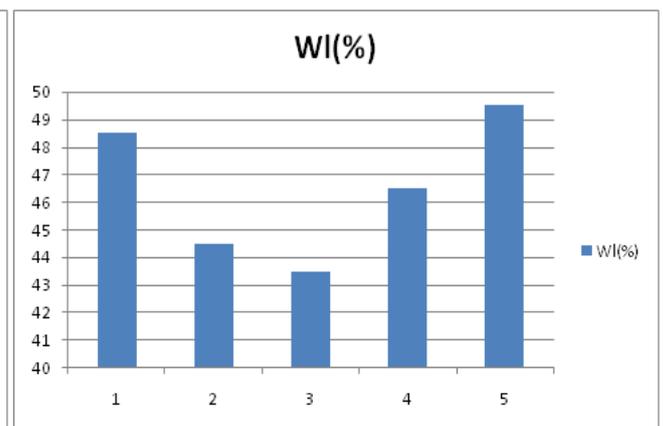
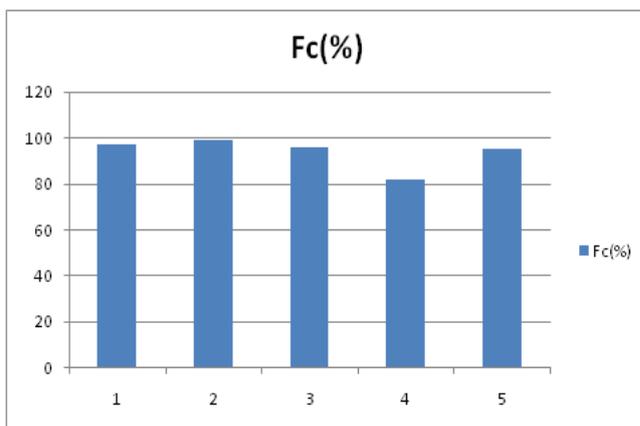
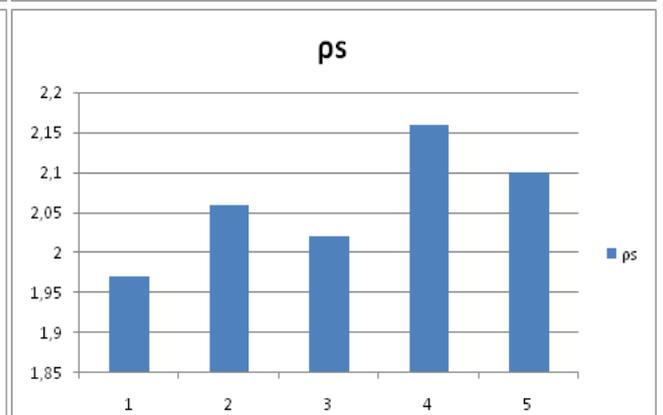
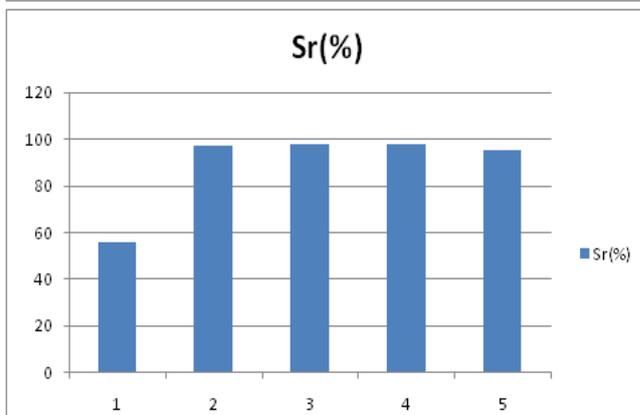
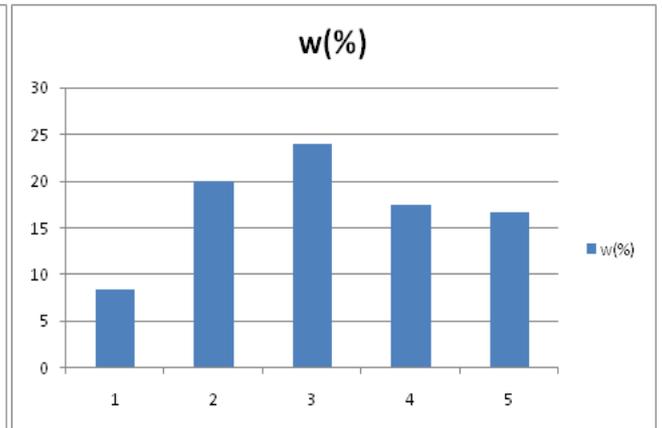
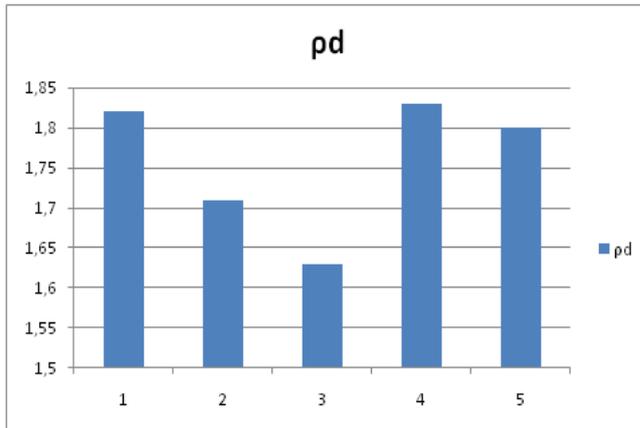


- Sol 2 : argile plastique :

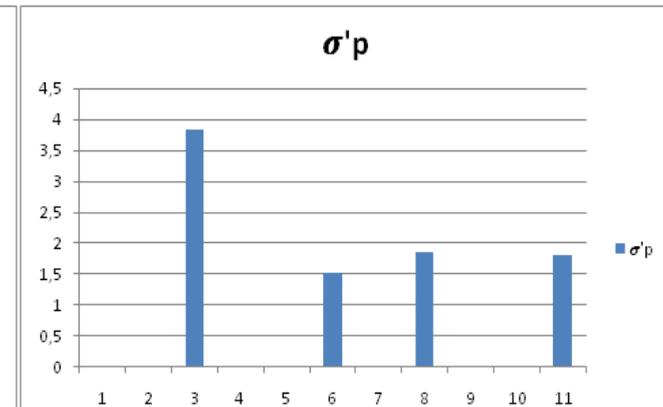
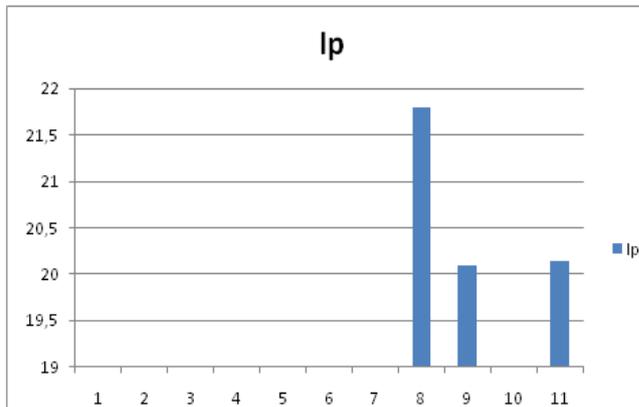
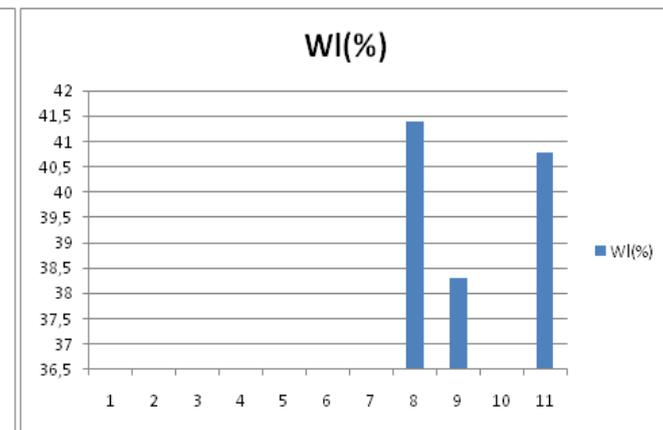
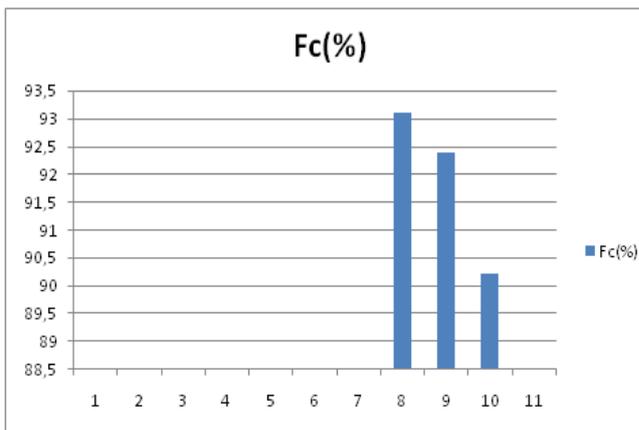
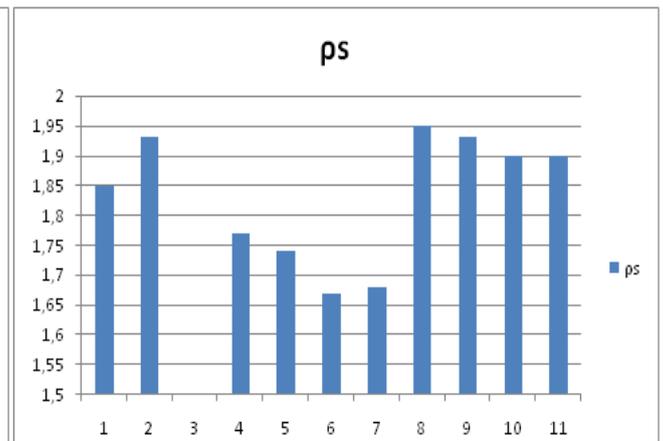
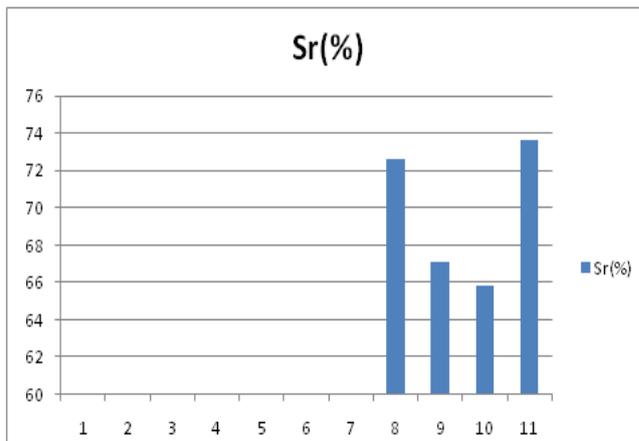
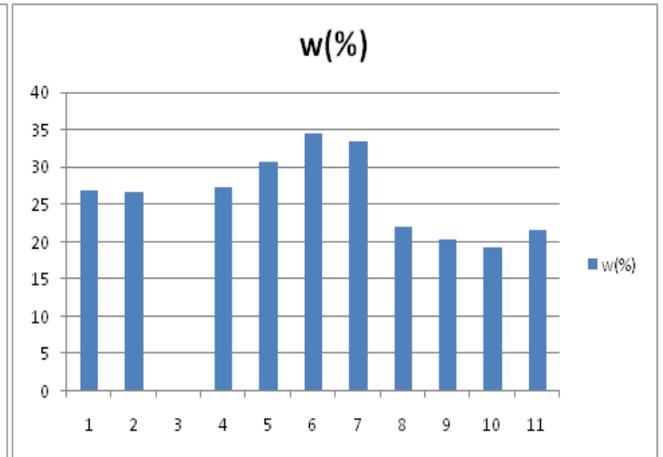
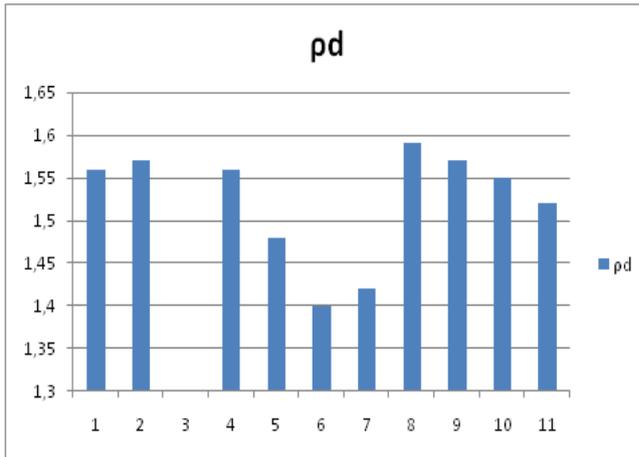


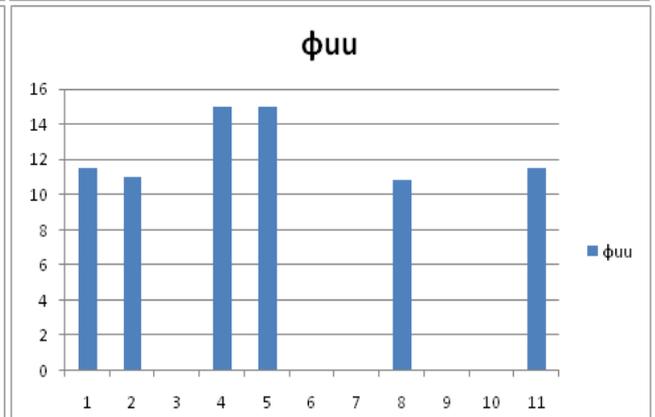
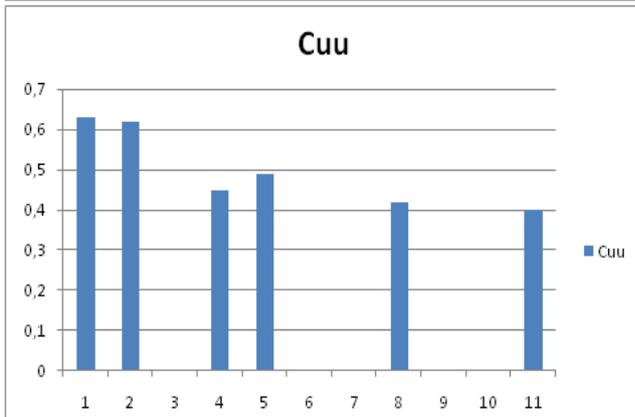
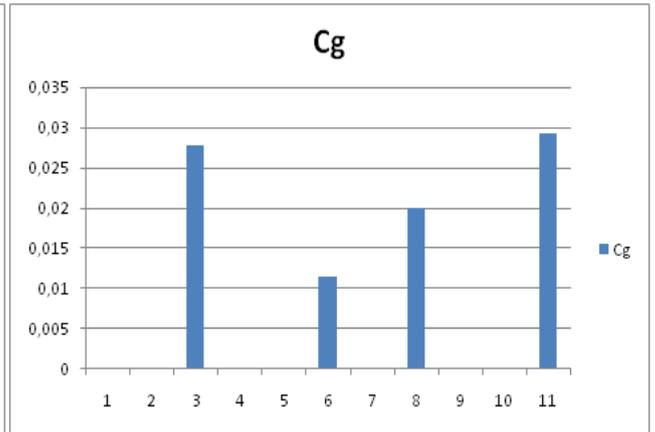
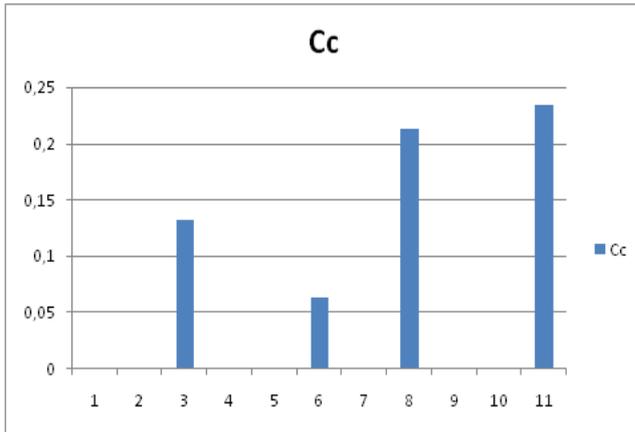


- Sol 3 : terre organique :

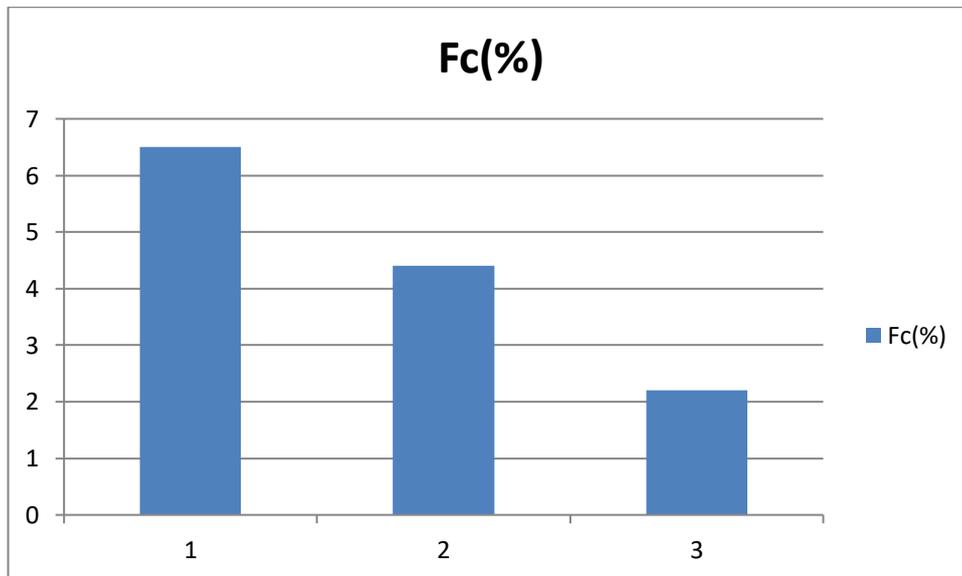


- Sol 5 : argile sableuse :

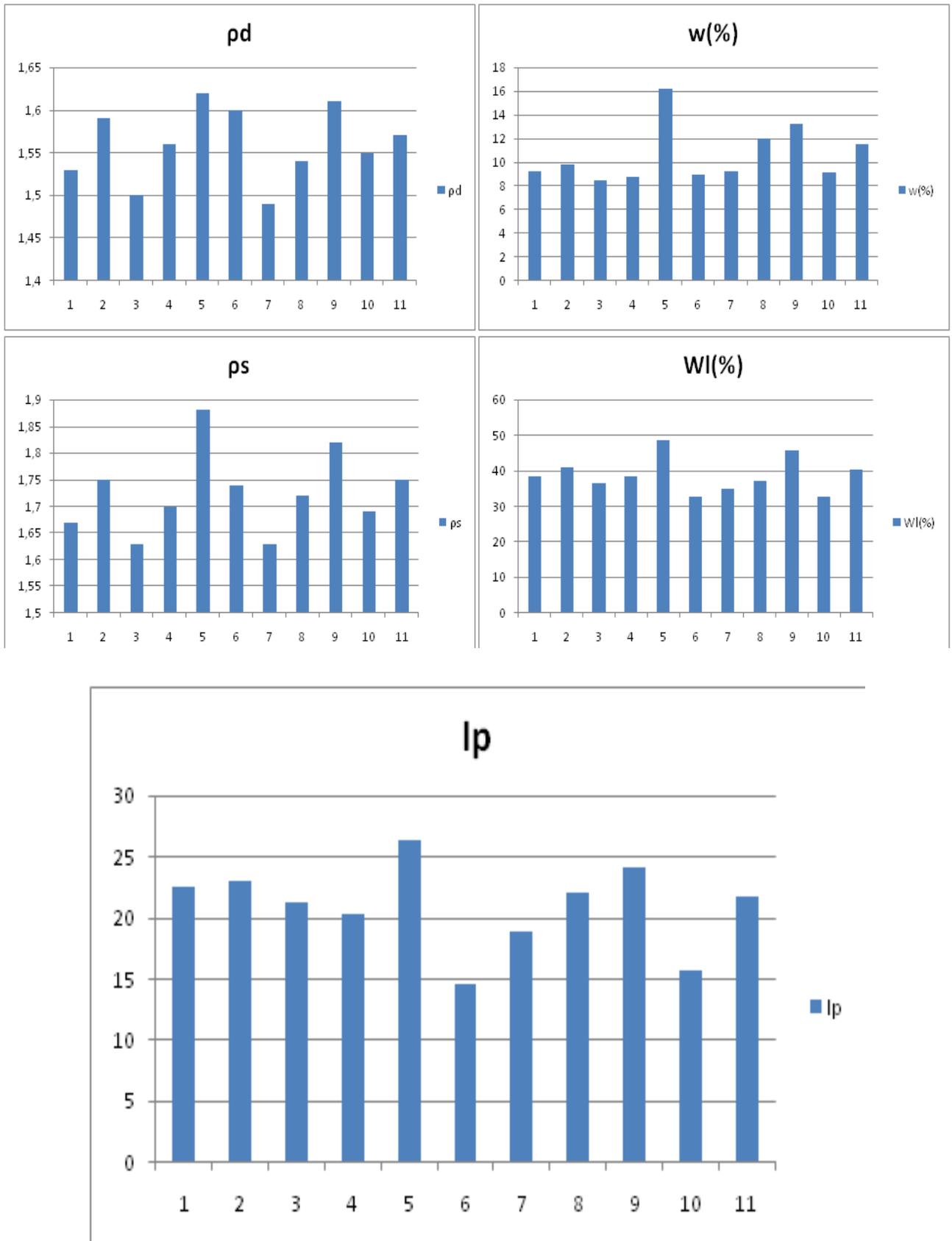




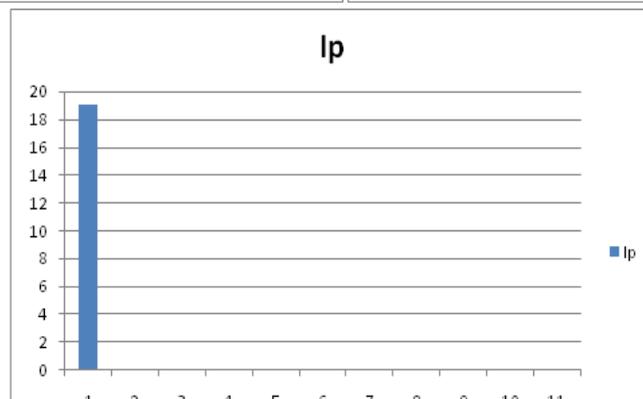
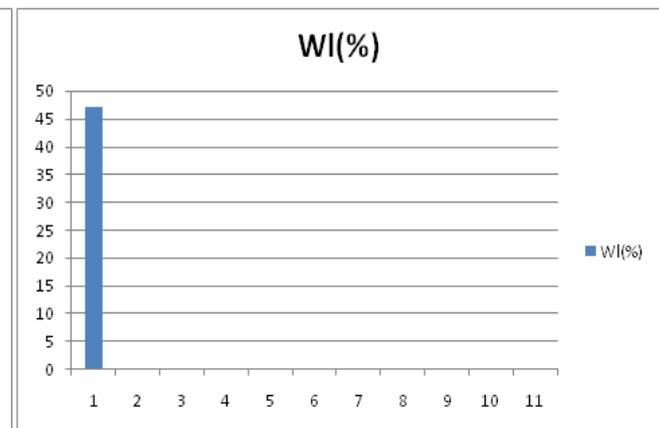
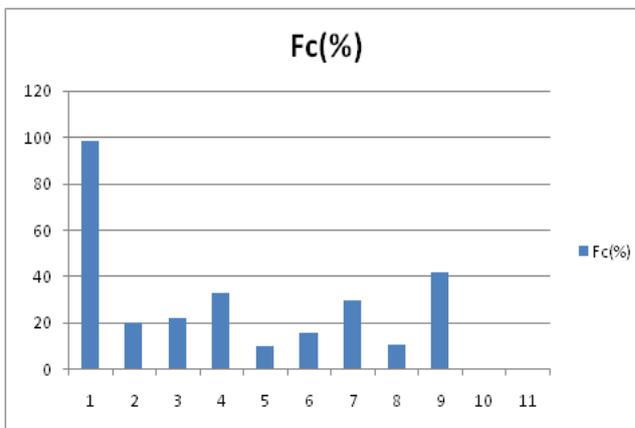
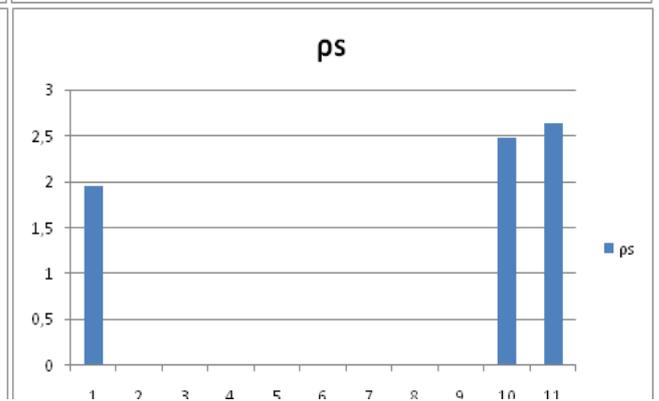
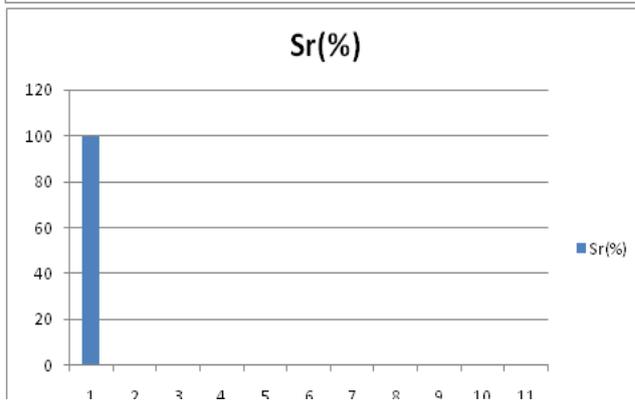
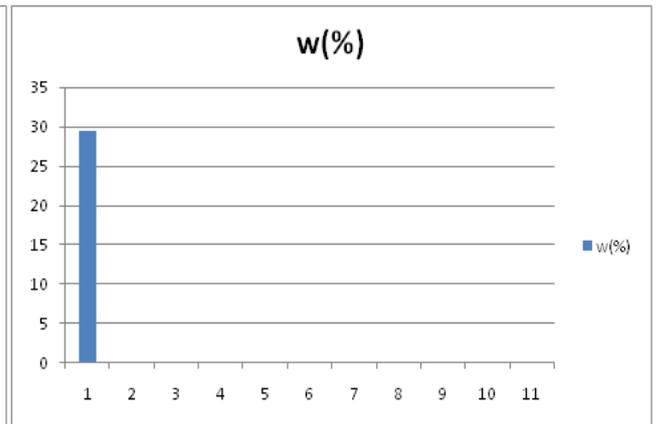
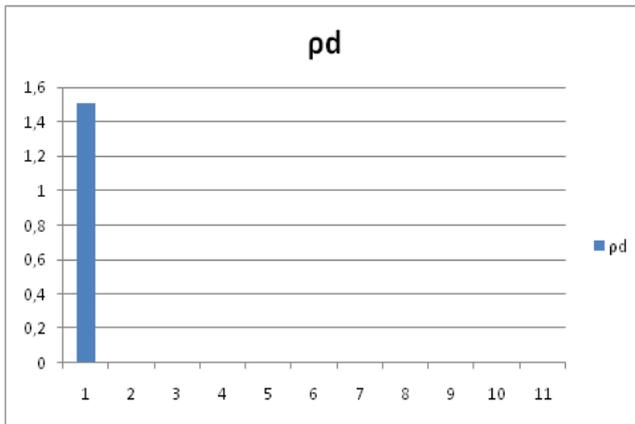
- Sol 6 : gravier



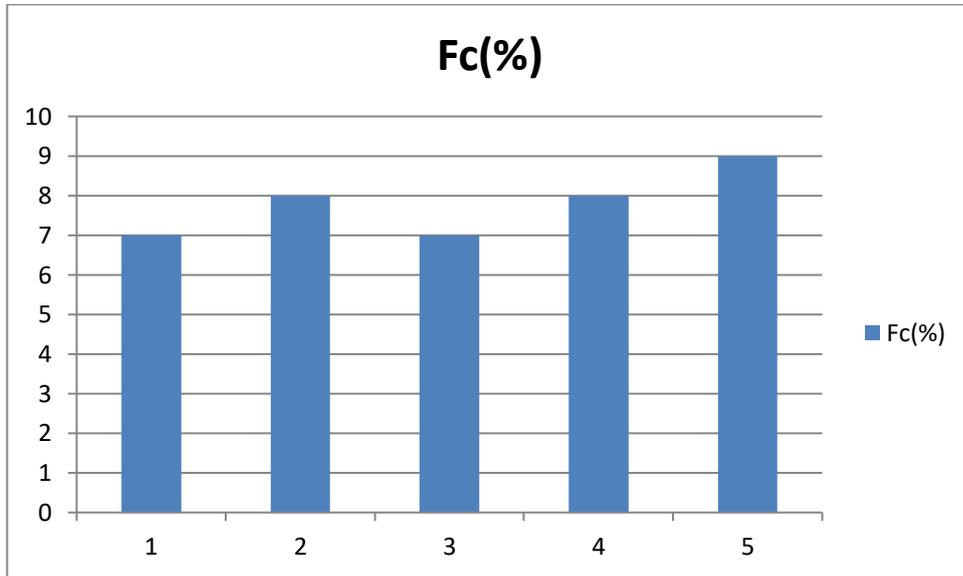
- Sol 7 : gré :



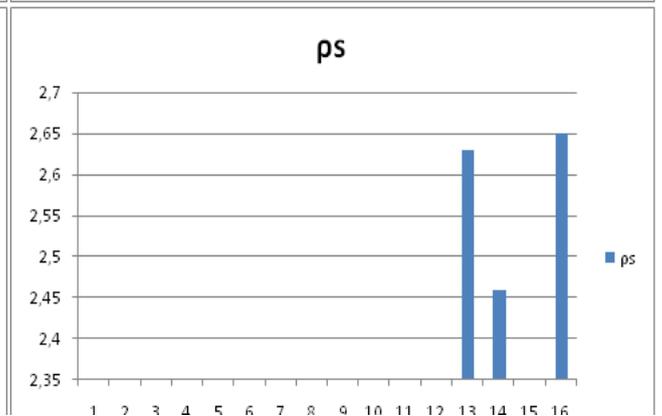
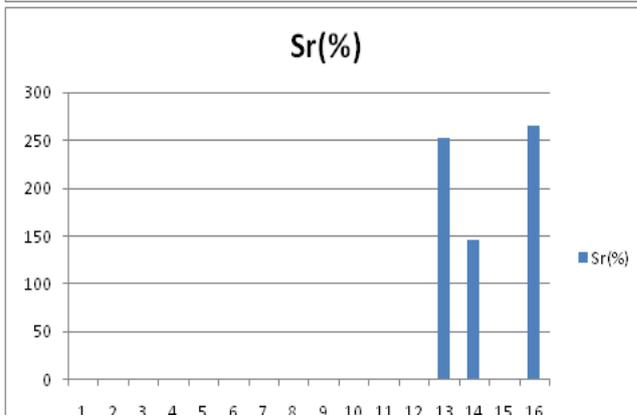
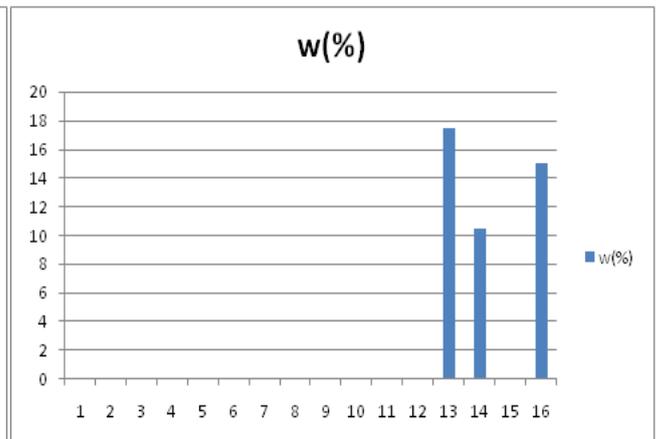
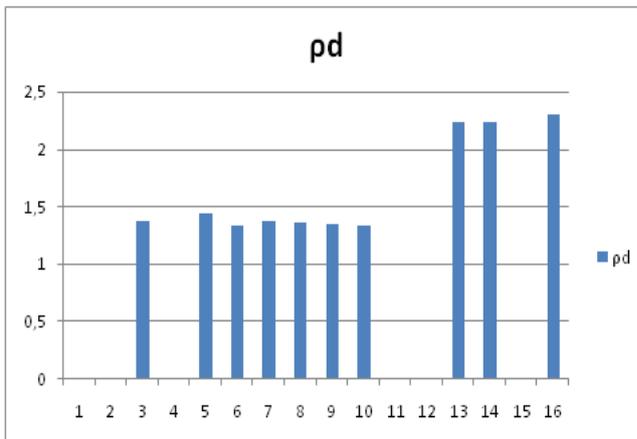
• Sol 8 : schiste :

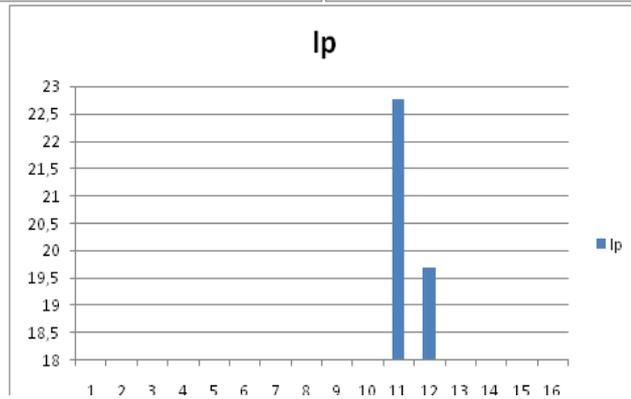
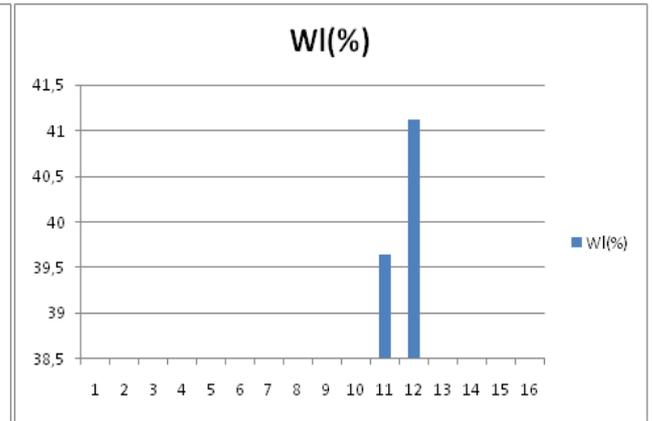
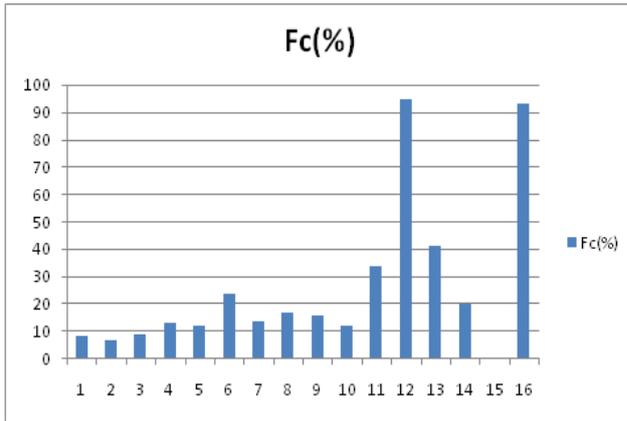


- Sol 9 : sable graveleux :

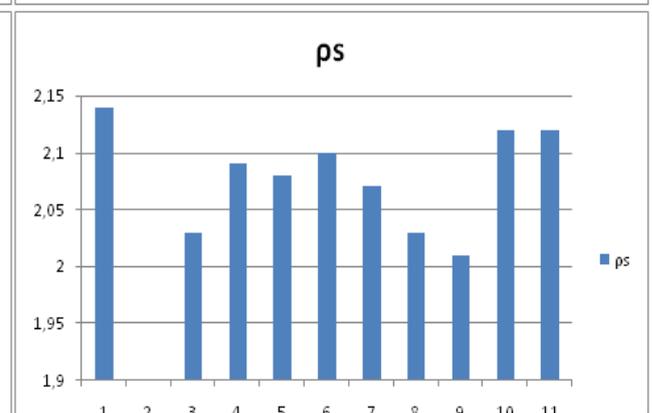
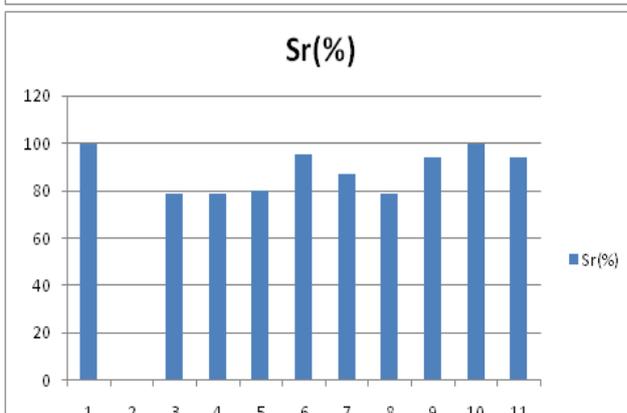
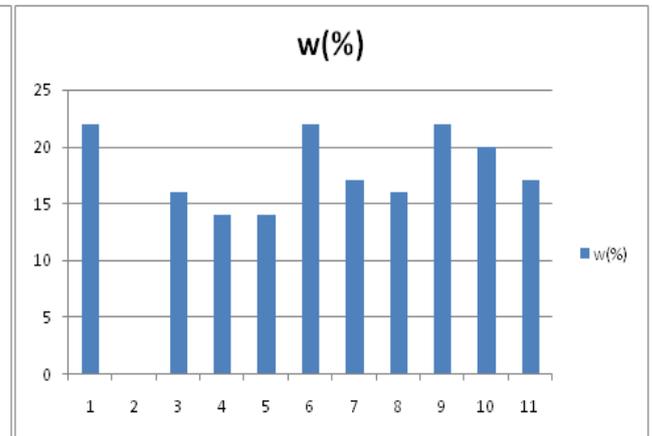
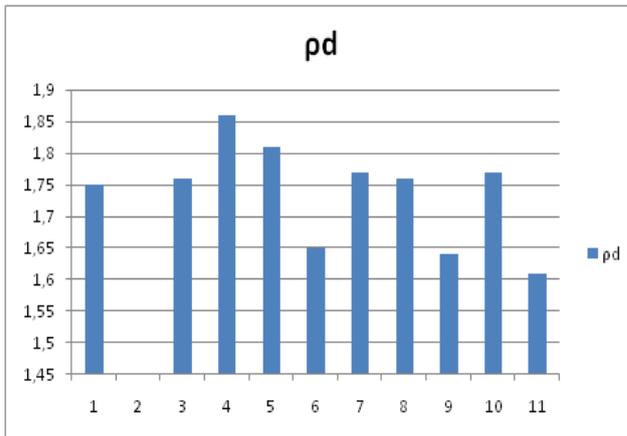


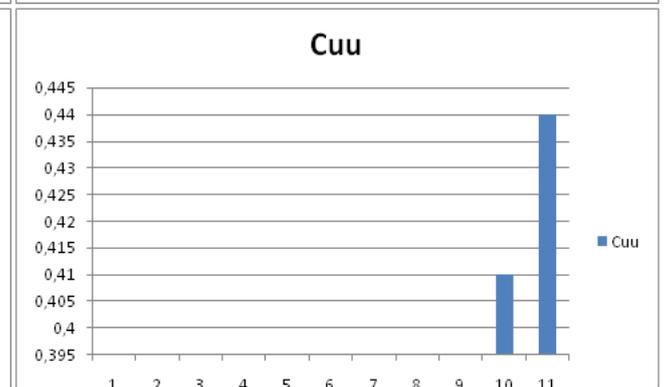
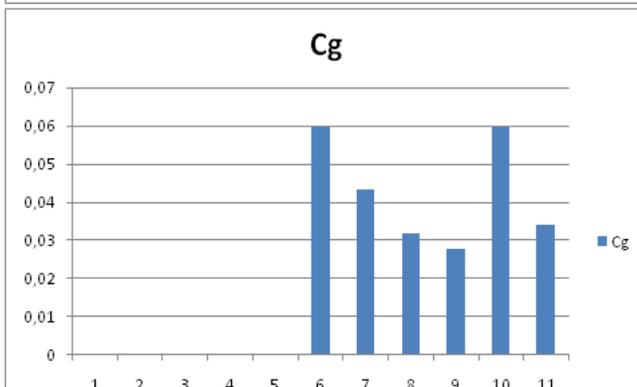
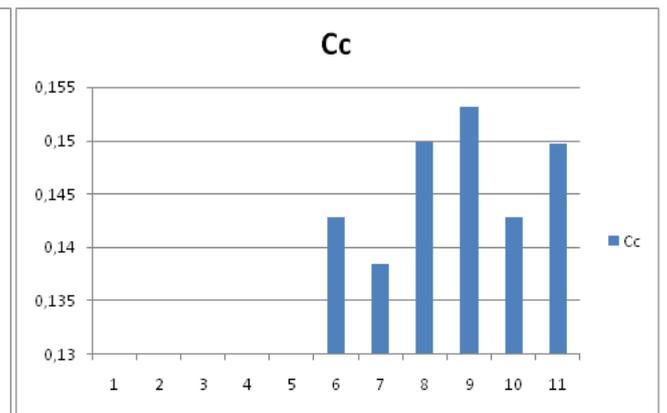
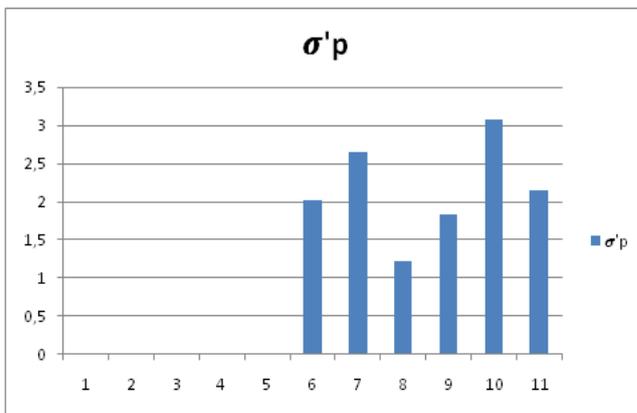
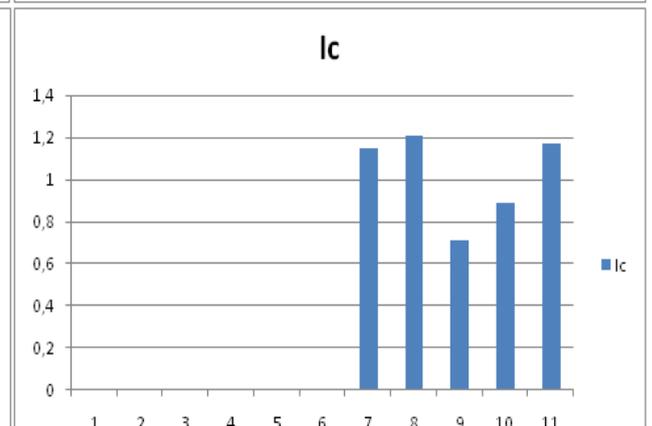
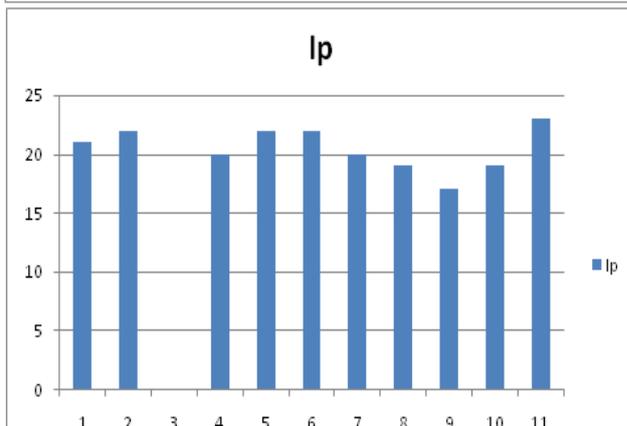
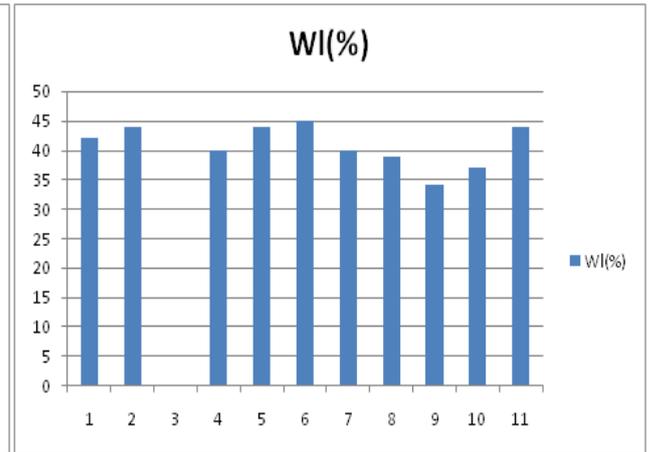
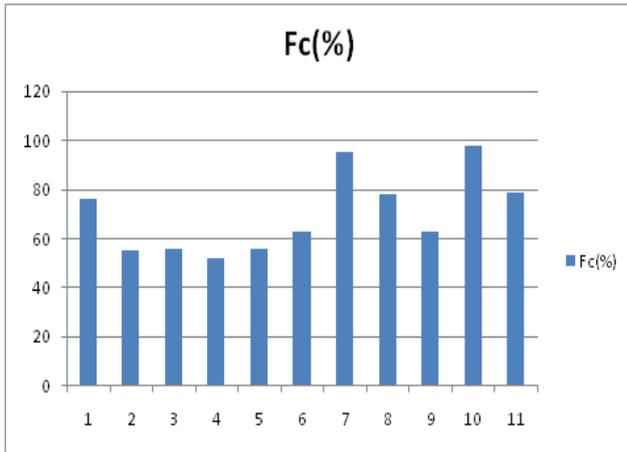
- Sol 10 : sable grossier :

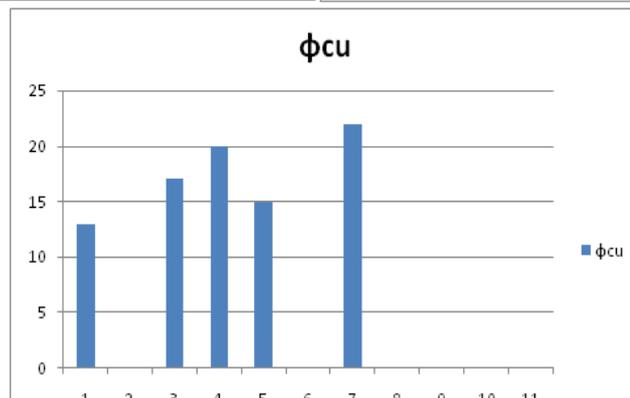
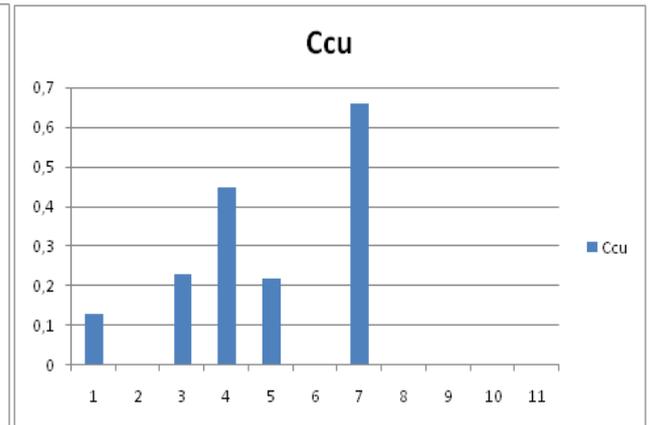
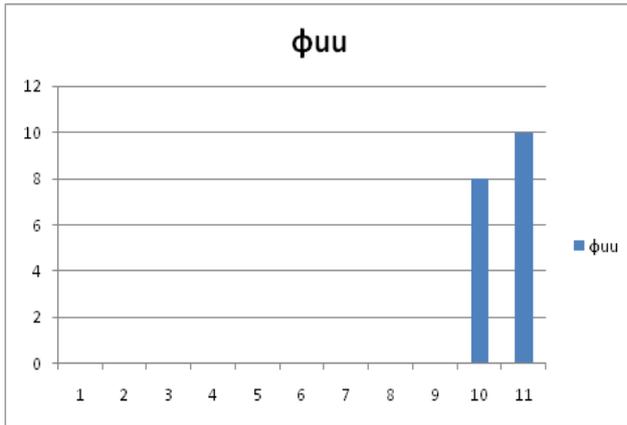




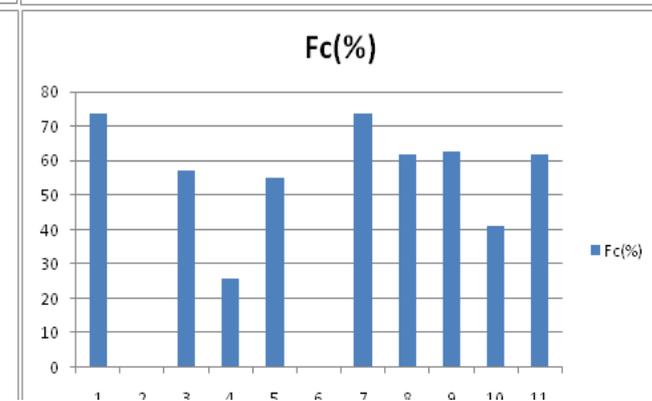
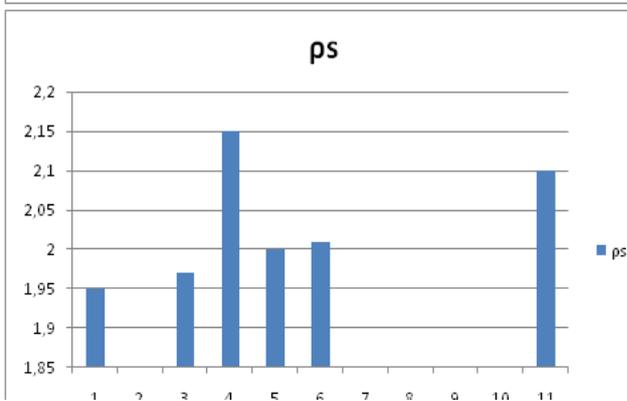
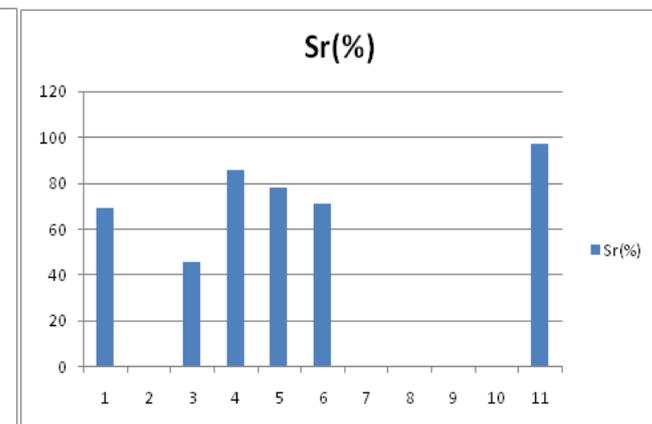
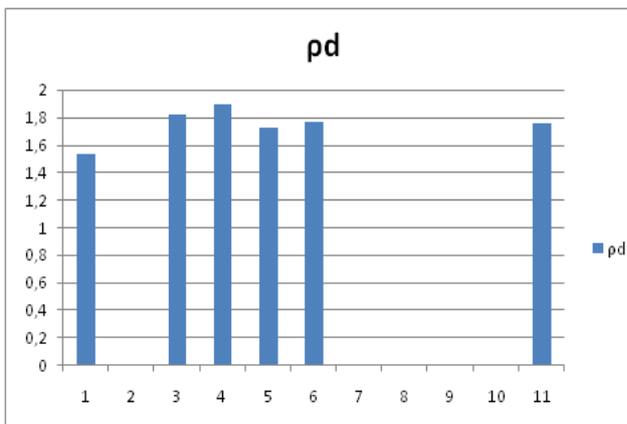
- Sol 11 : limon argileux :

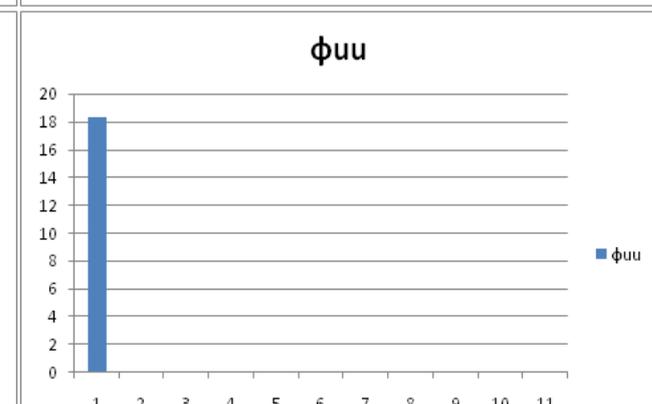
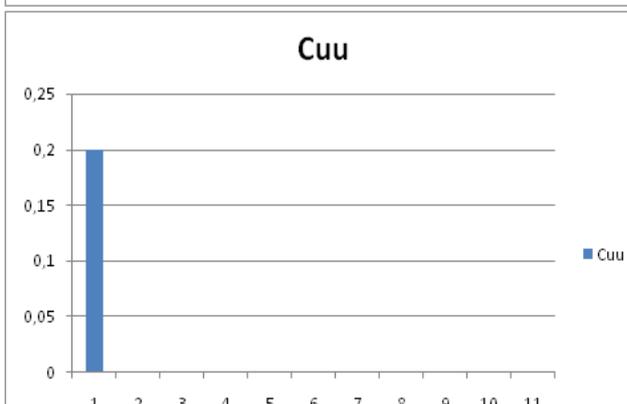
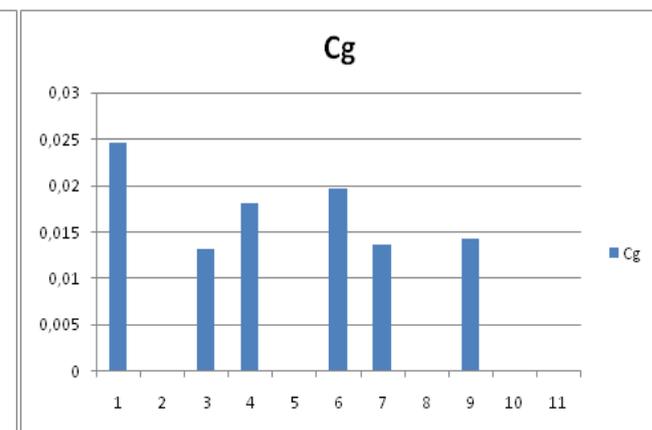
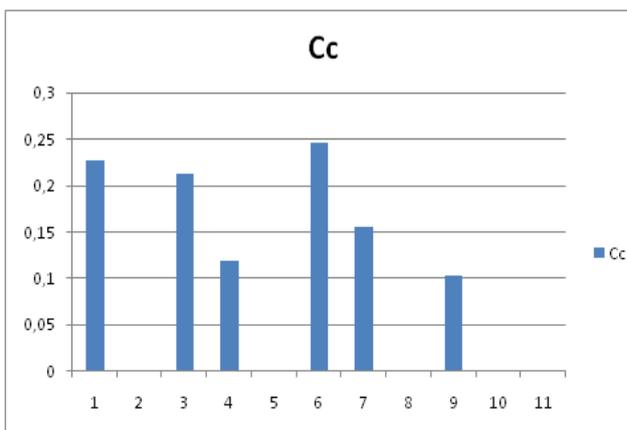
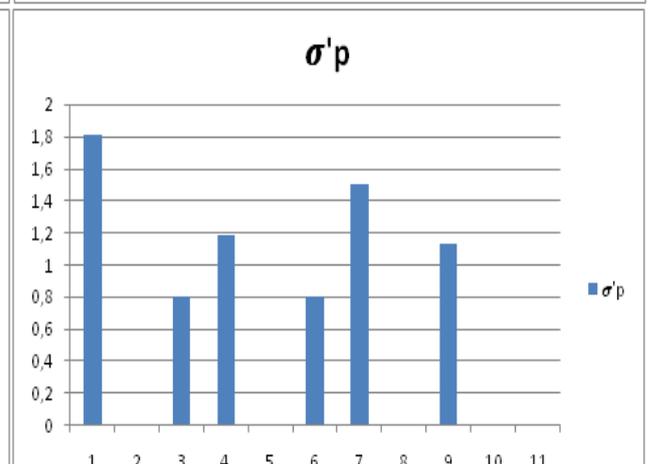
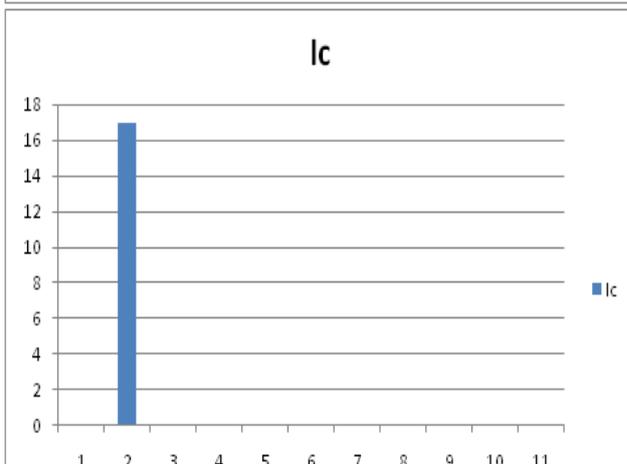
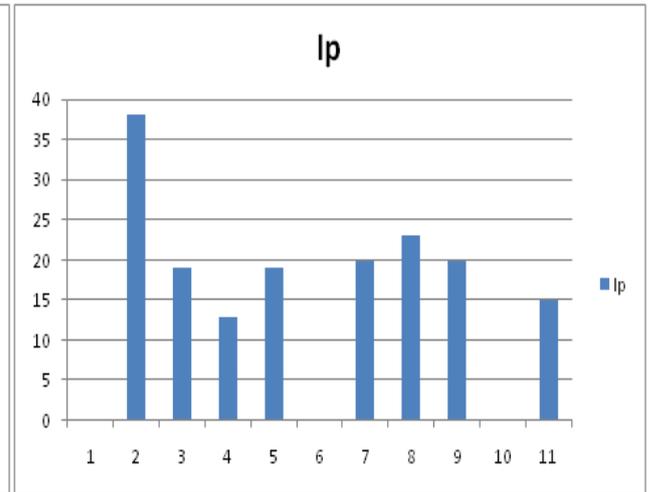
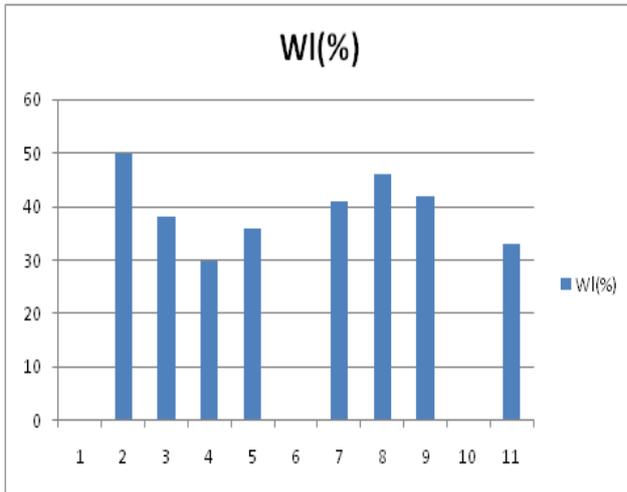


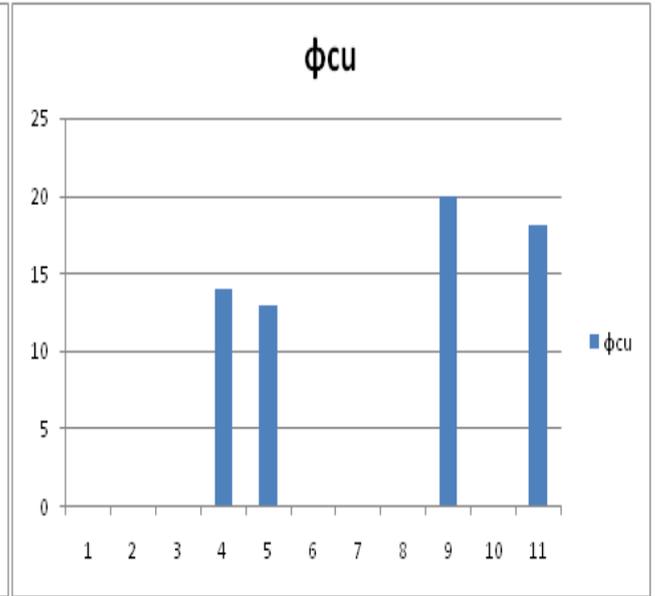
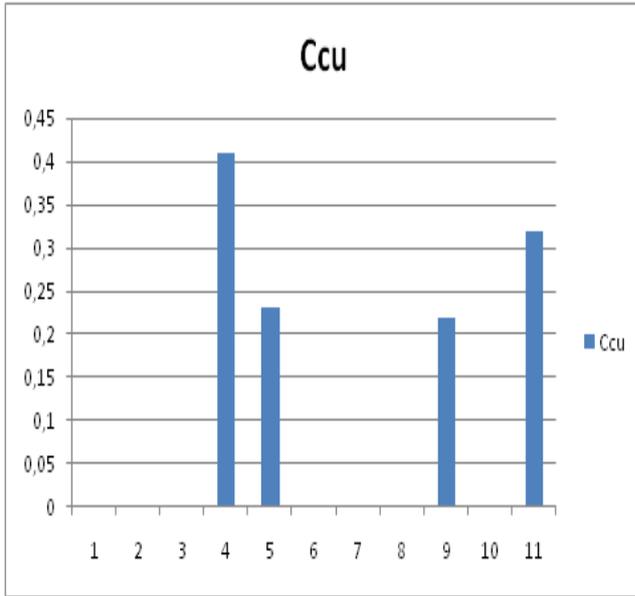




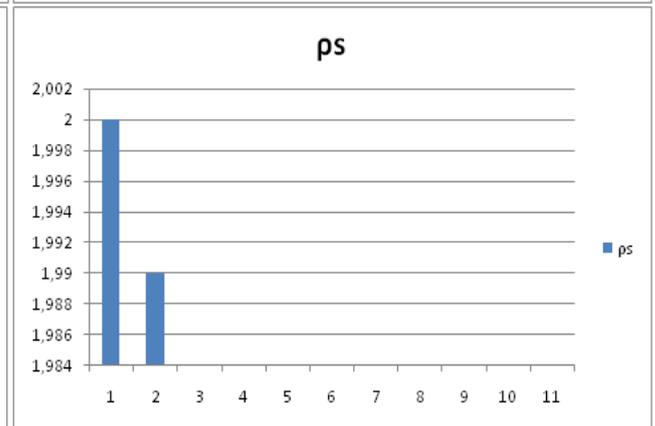
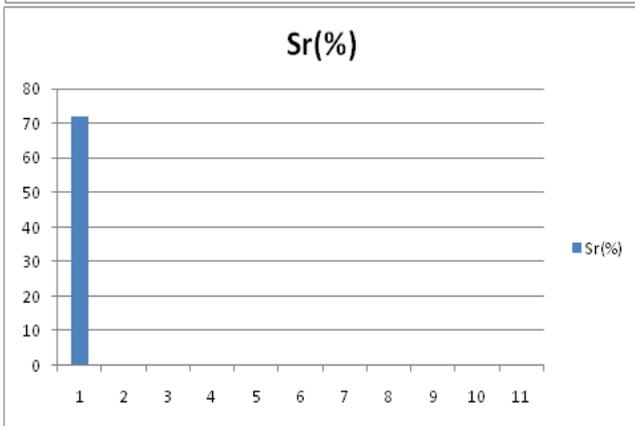
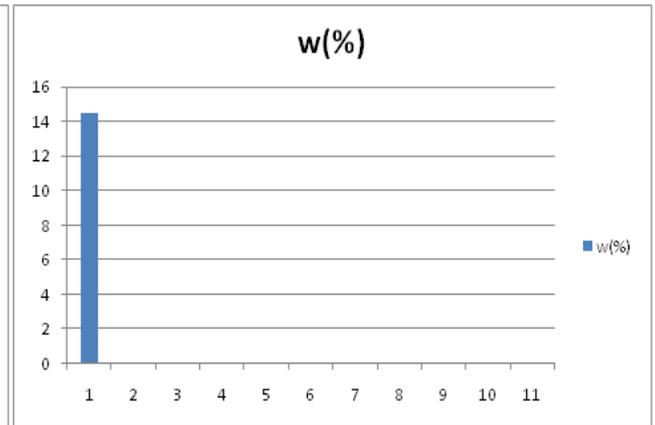
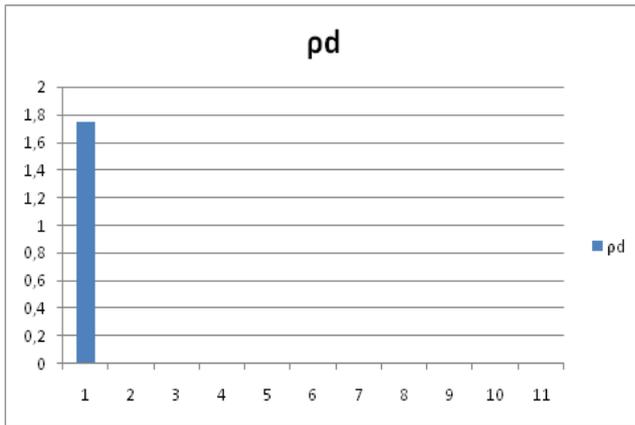
- Sol 12 : limon sableux

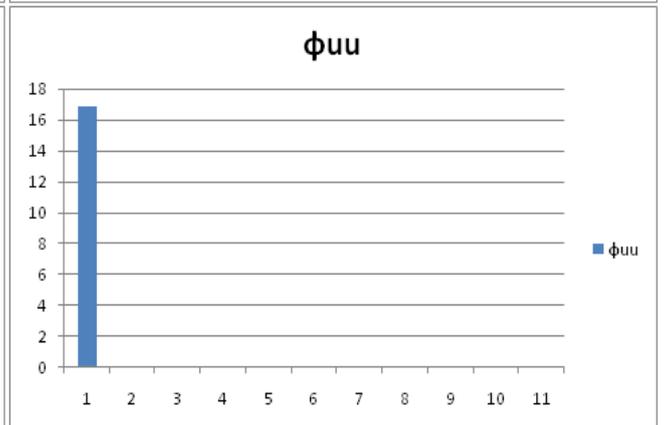
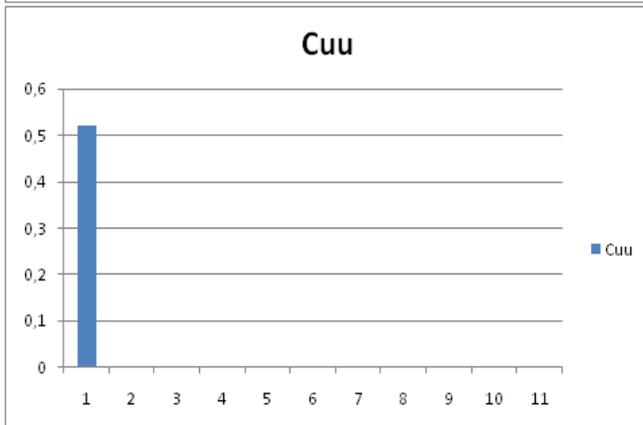
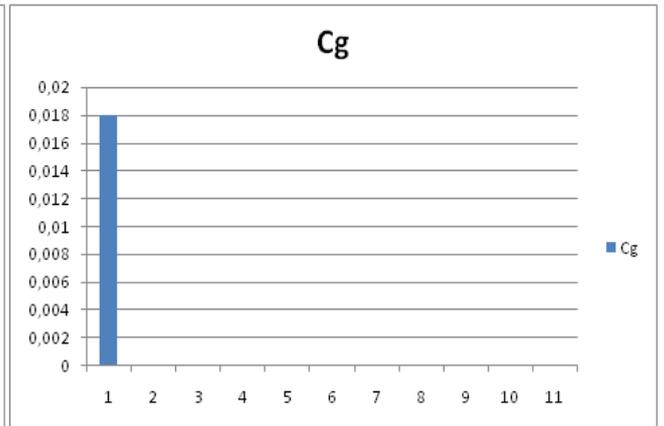
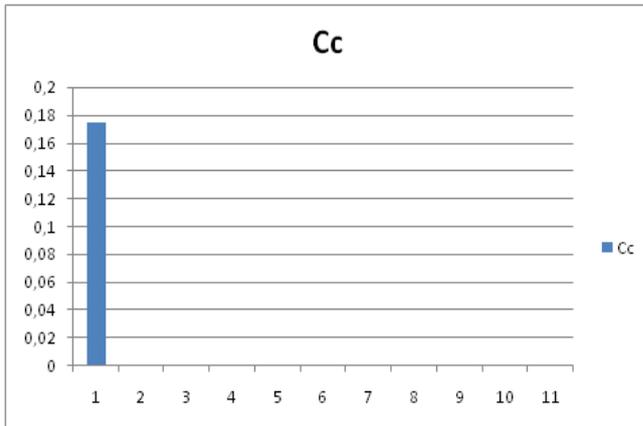
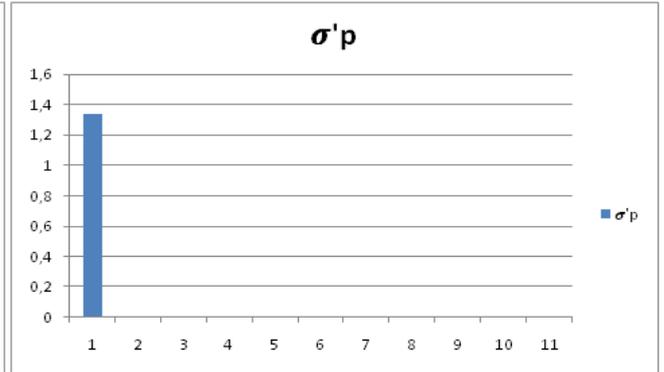
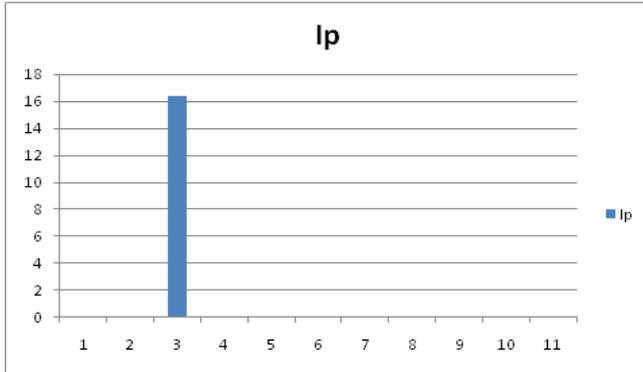
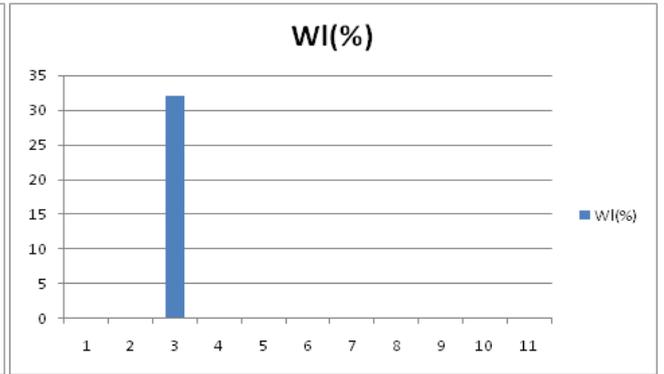
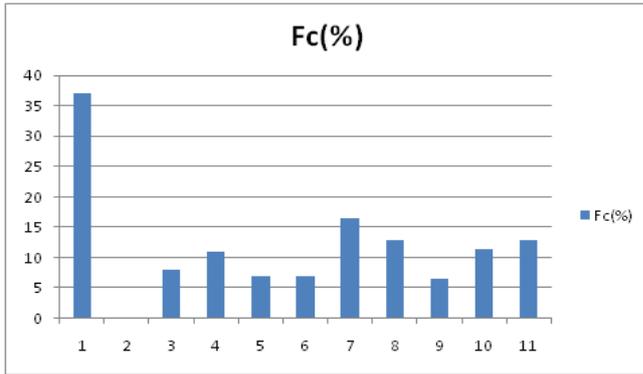




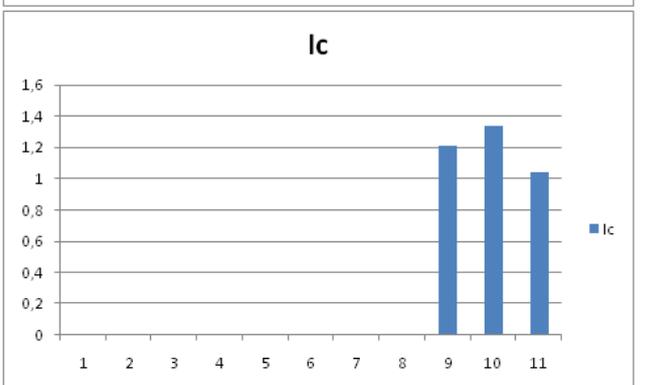
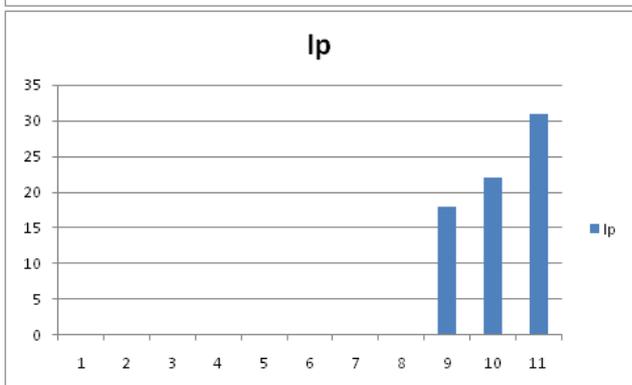
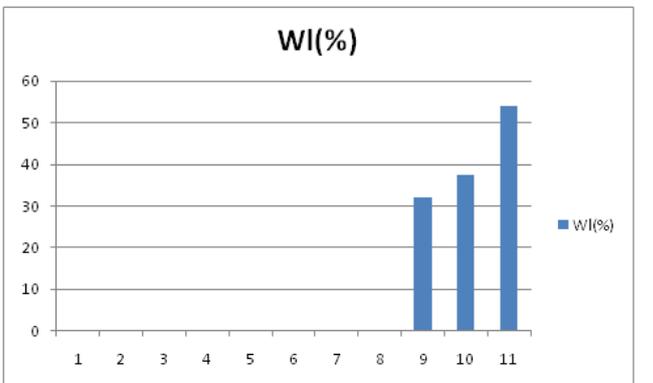
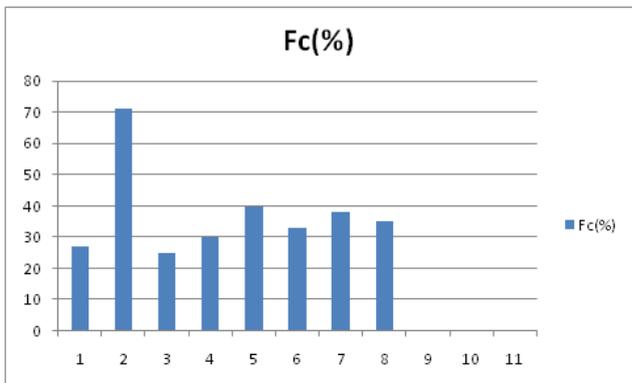
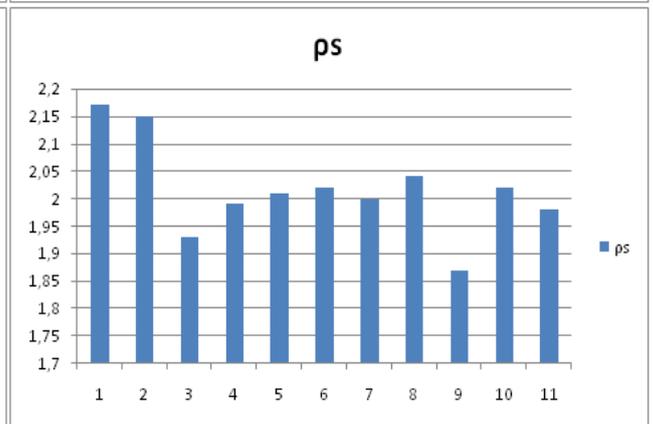
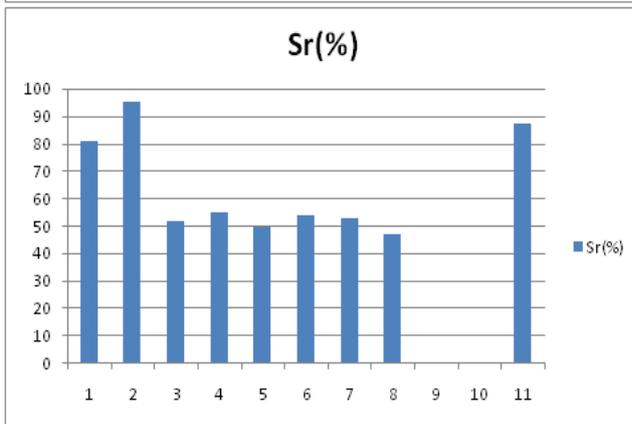
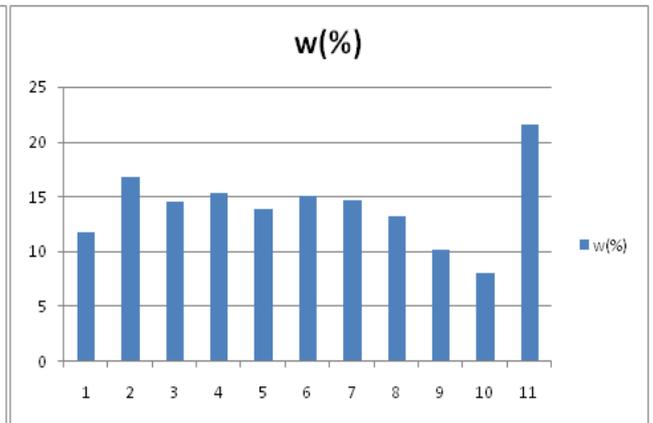
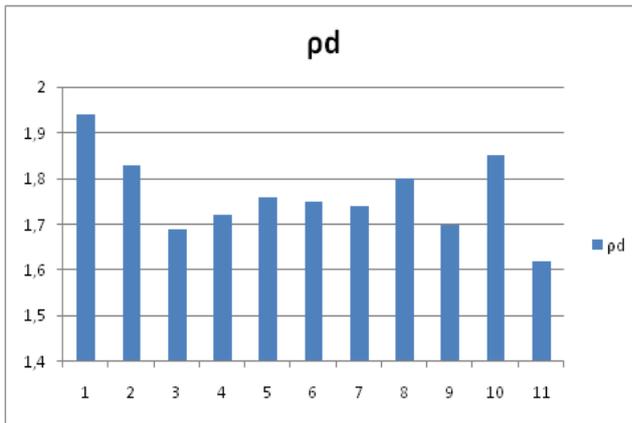


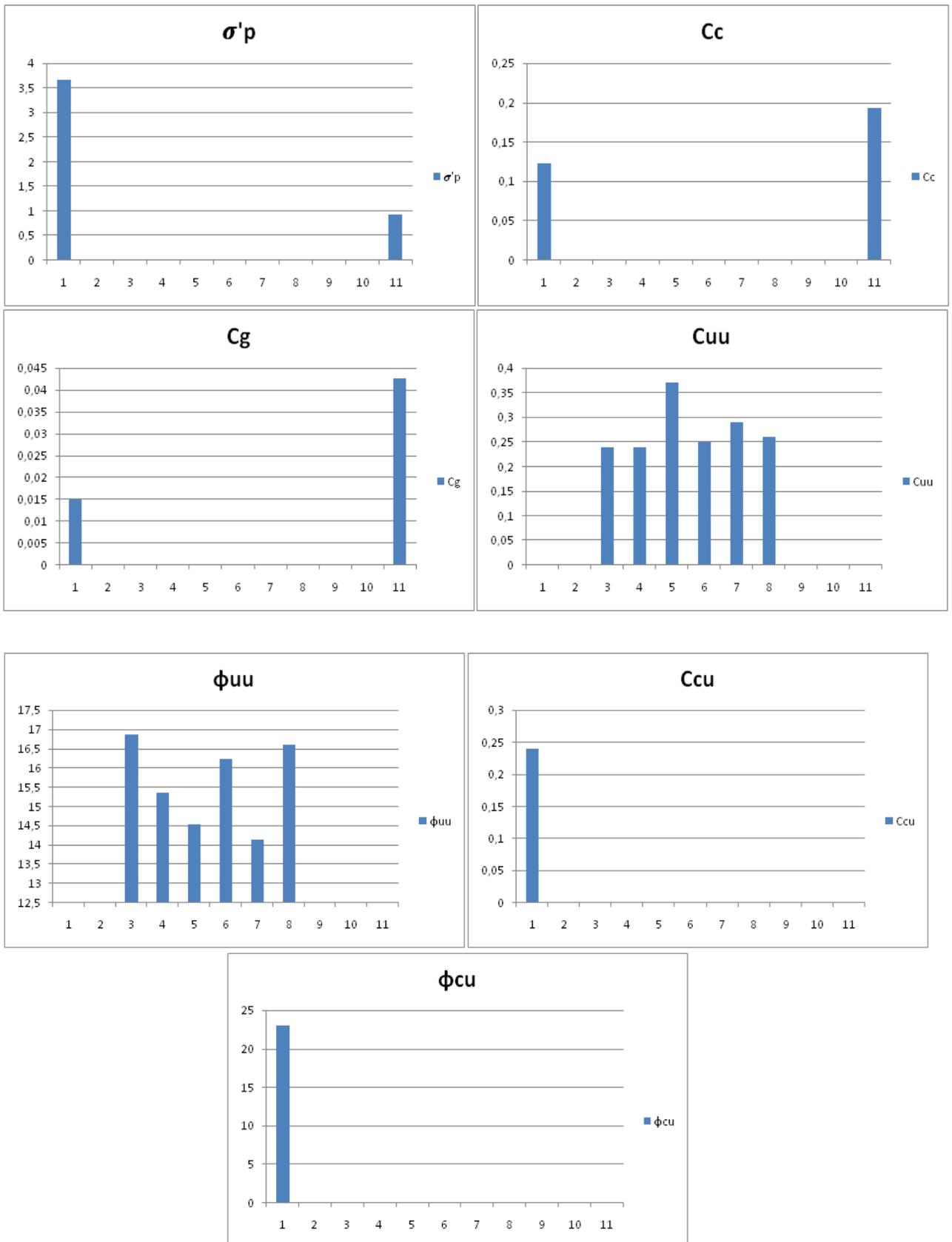
- Sol 13 : Remblai.



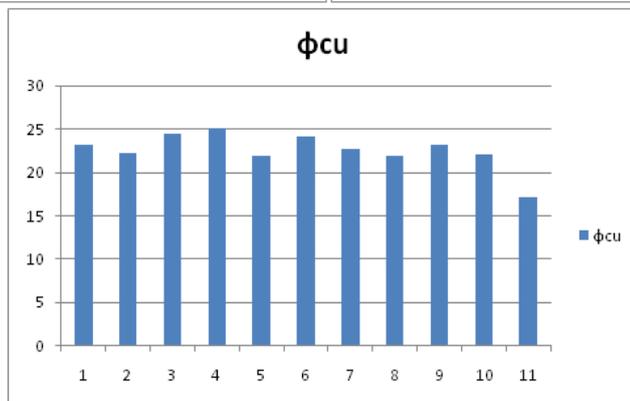
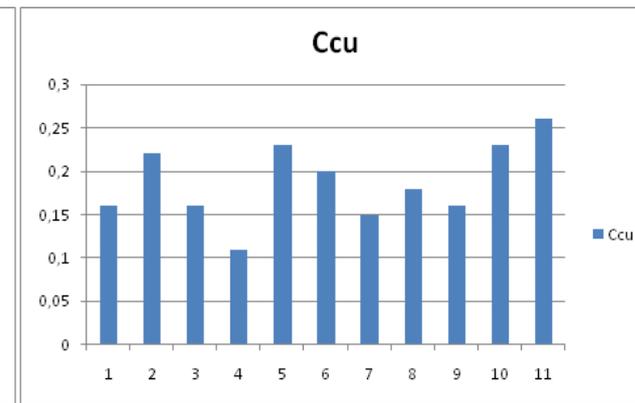
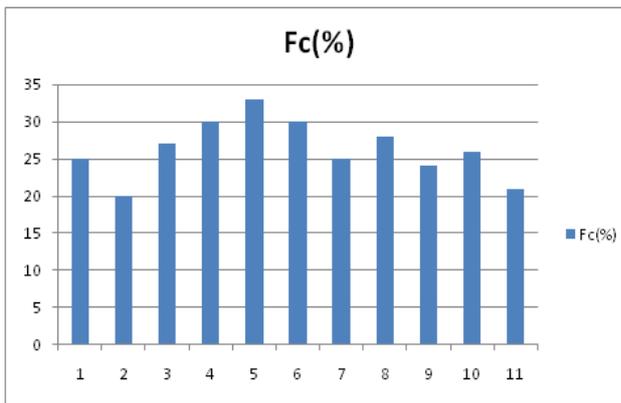
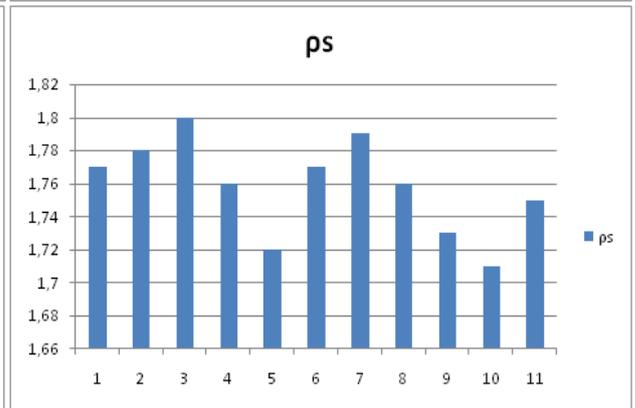
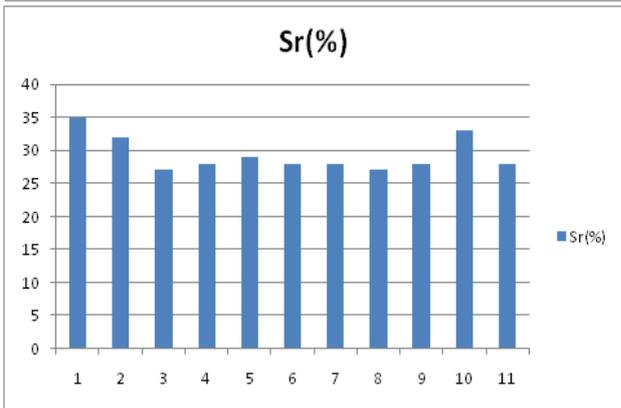
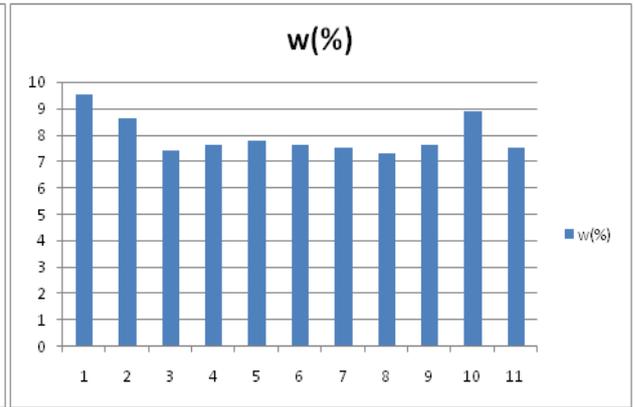
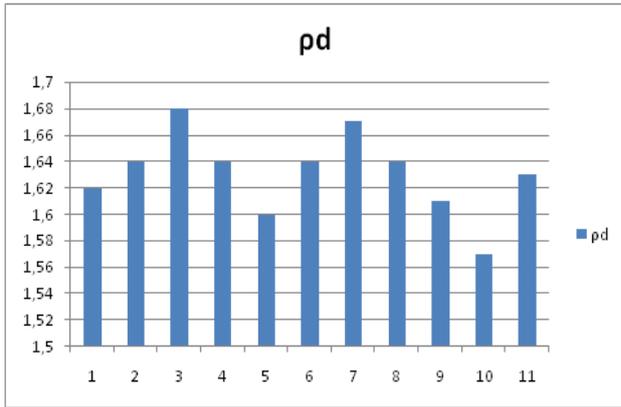


- Sol 14 : sable argileux

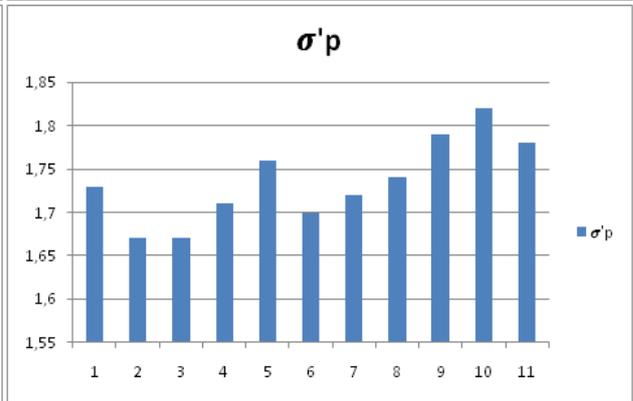
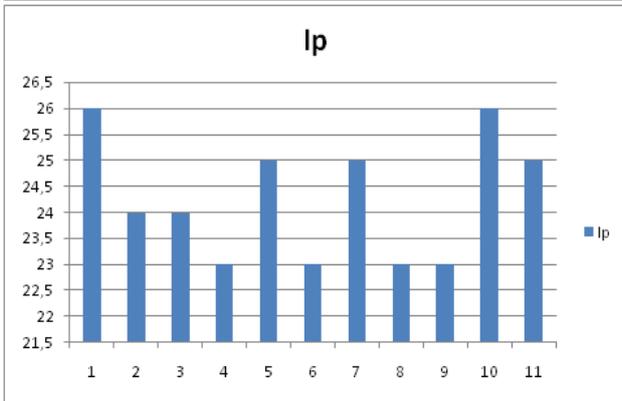
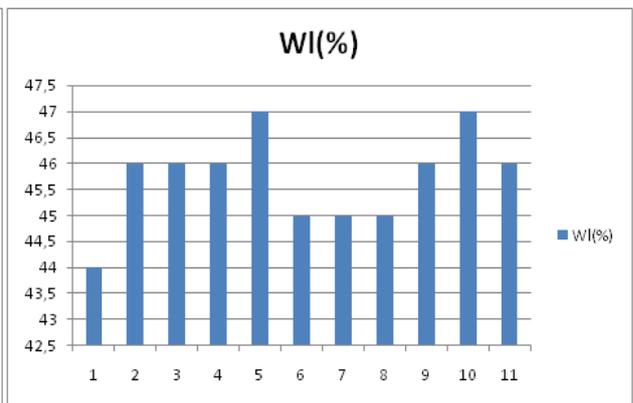
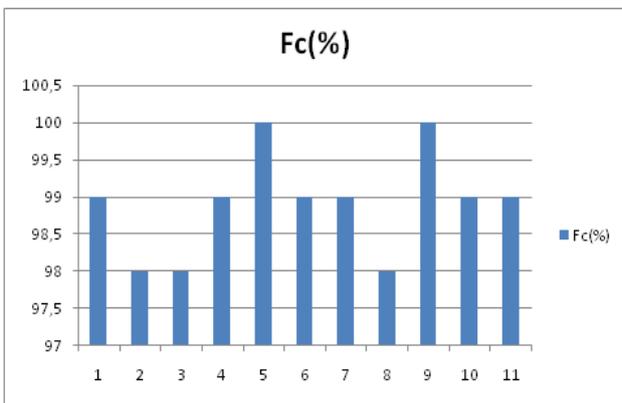
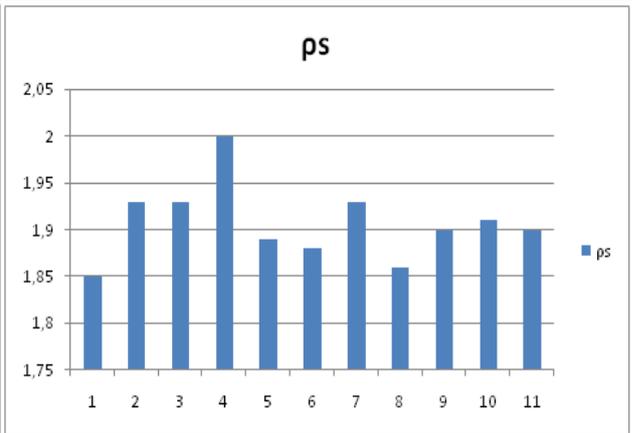
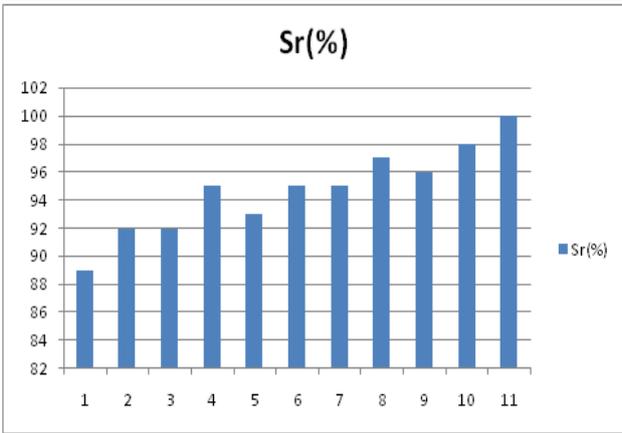
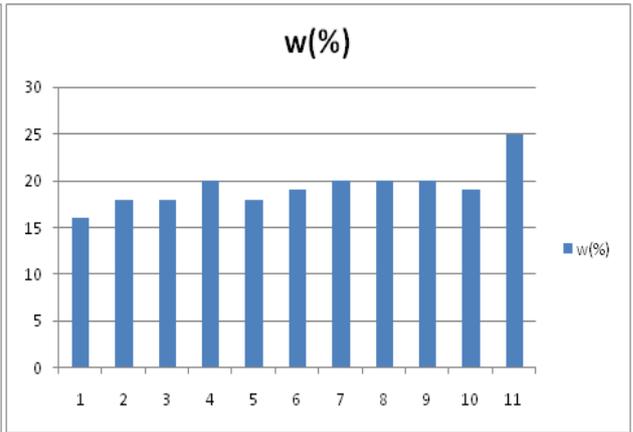
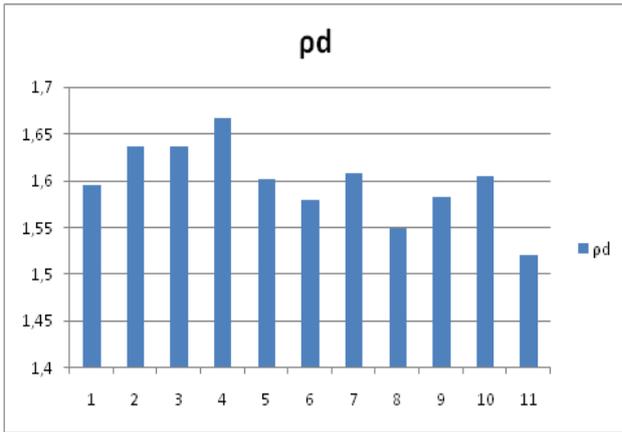


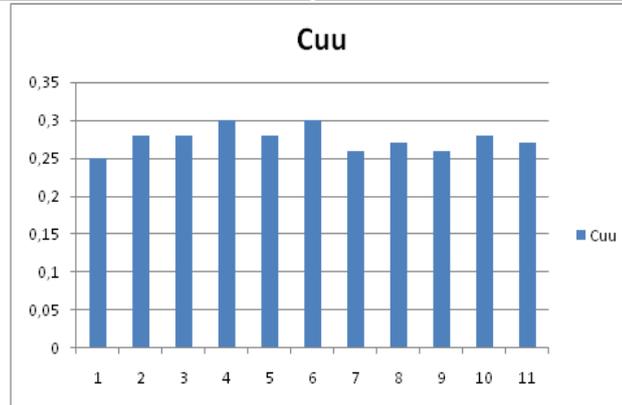
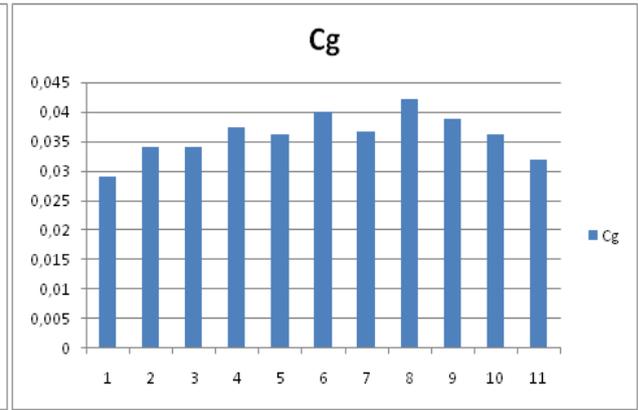
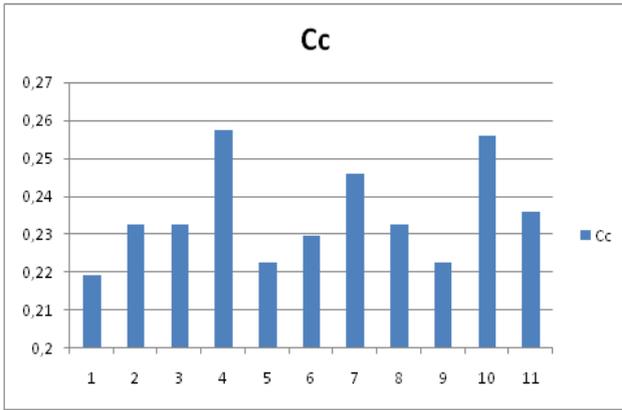


- Sol 15 : sable limoneux.

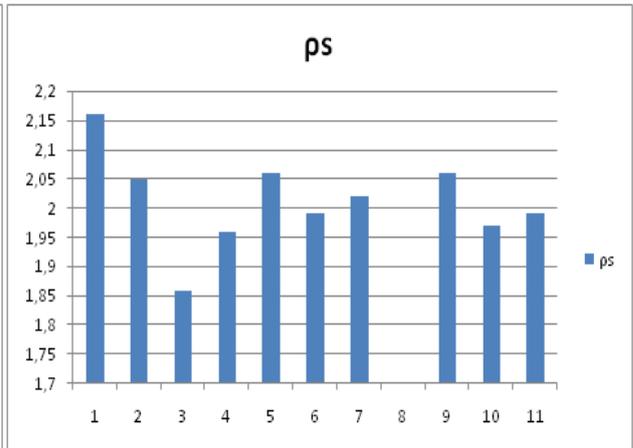
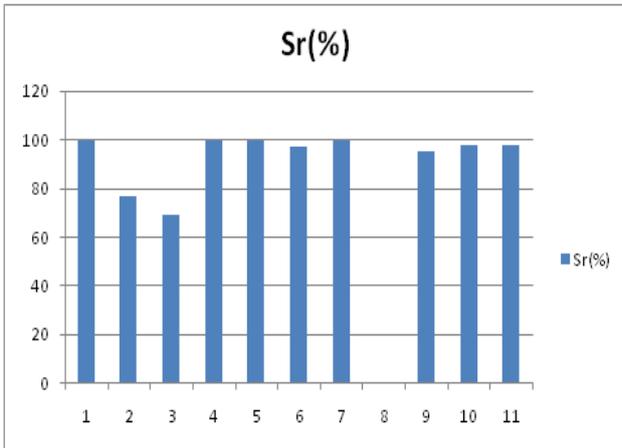
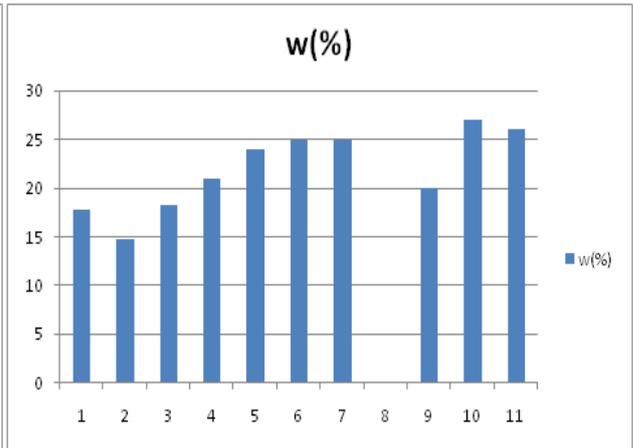
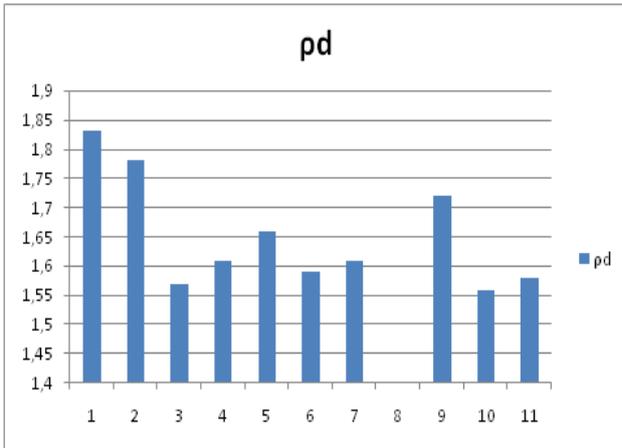


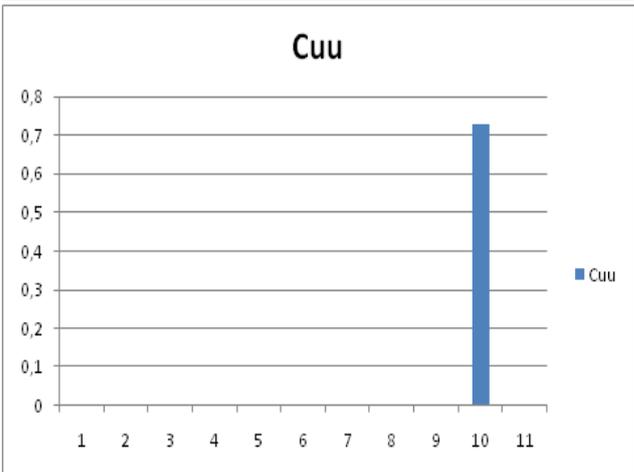
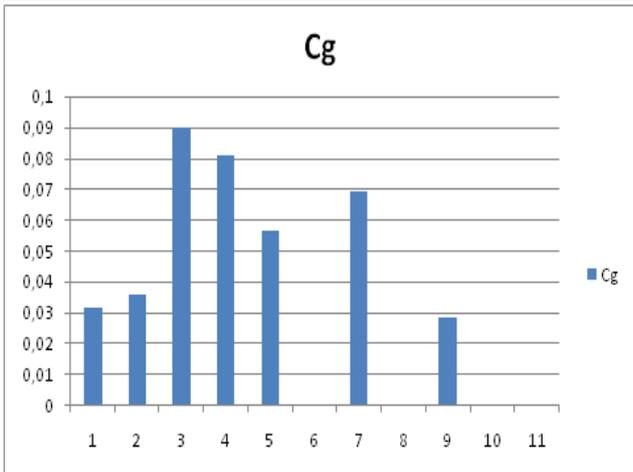
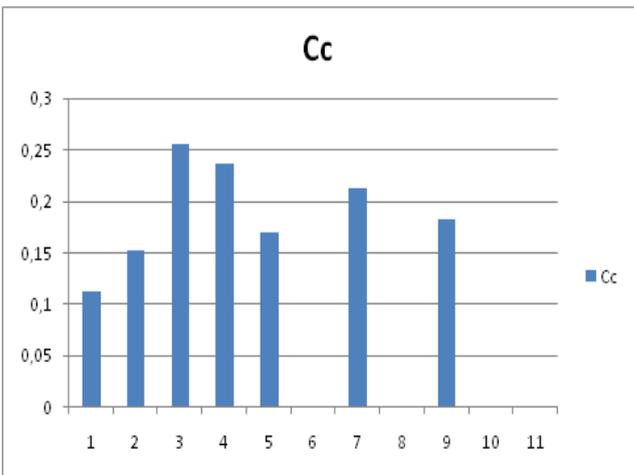
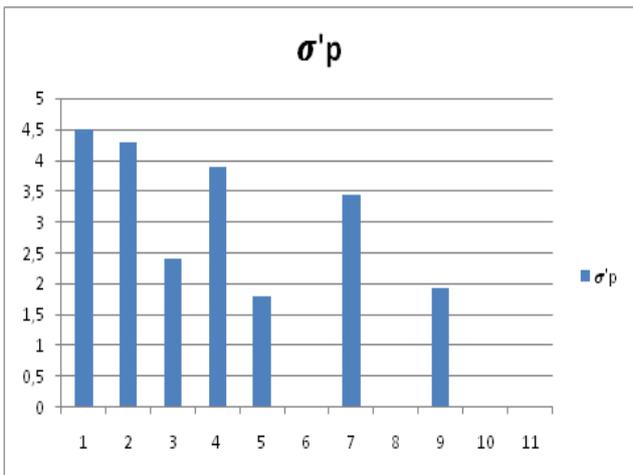
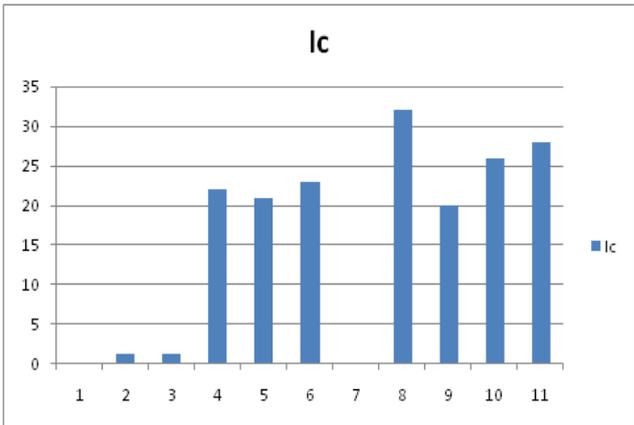
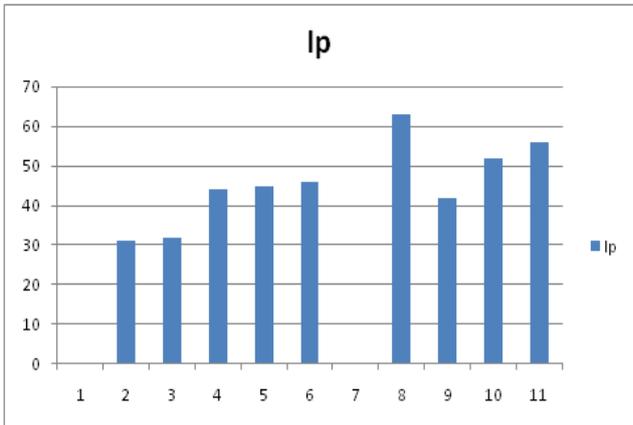
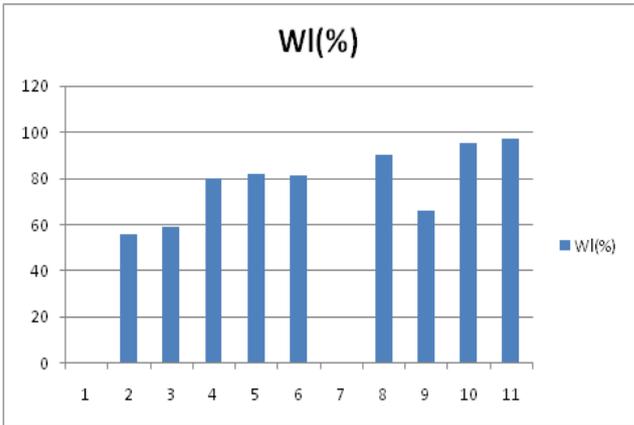
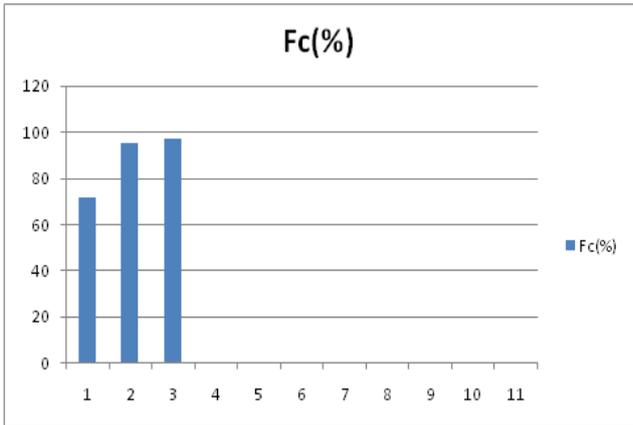
- Sol 16 : limons

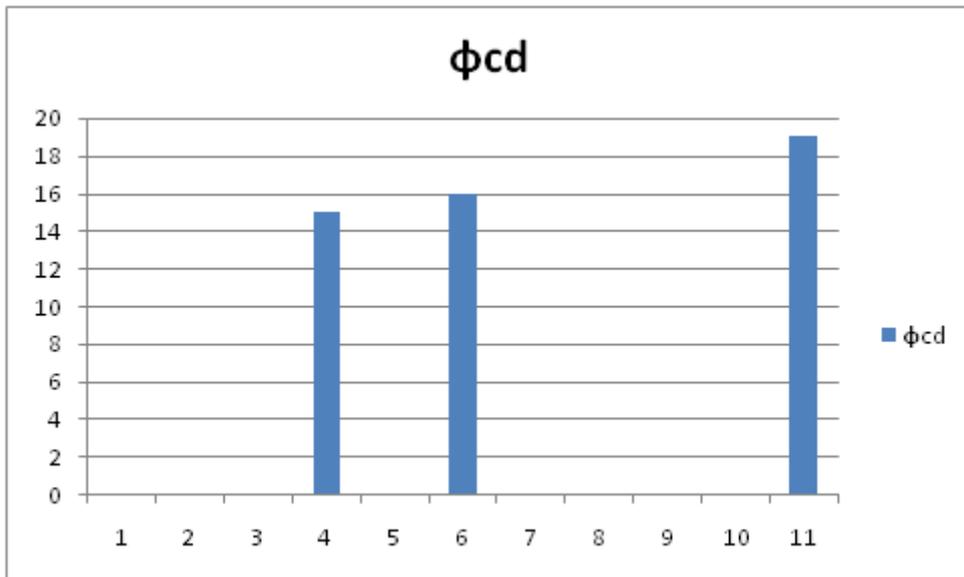
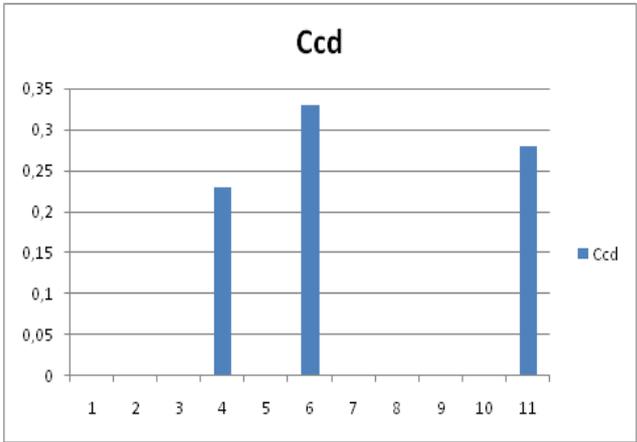
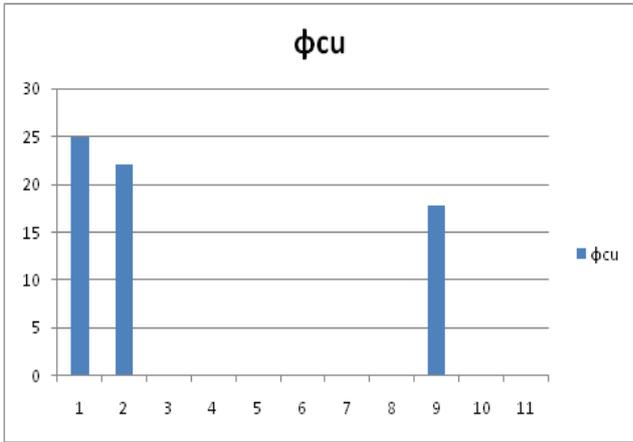
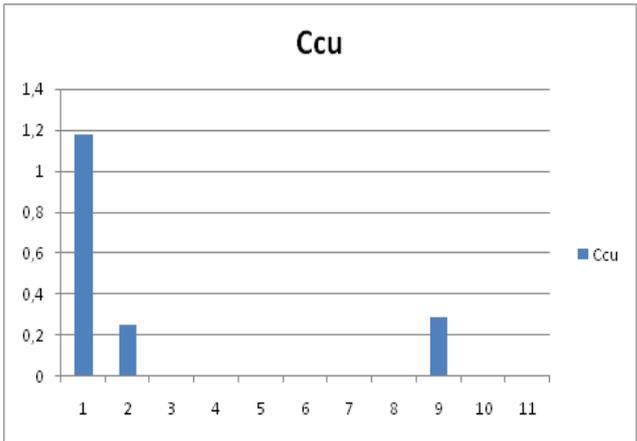
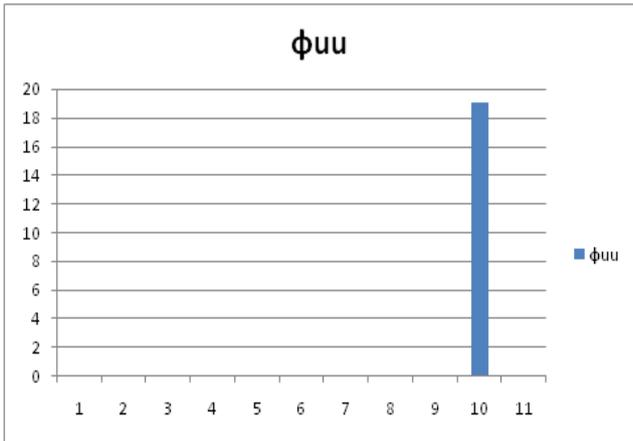




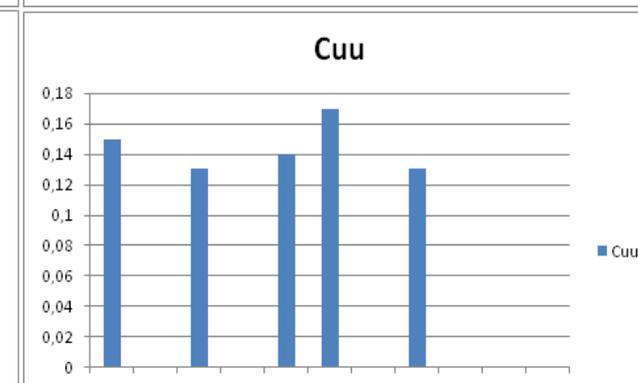
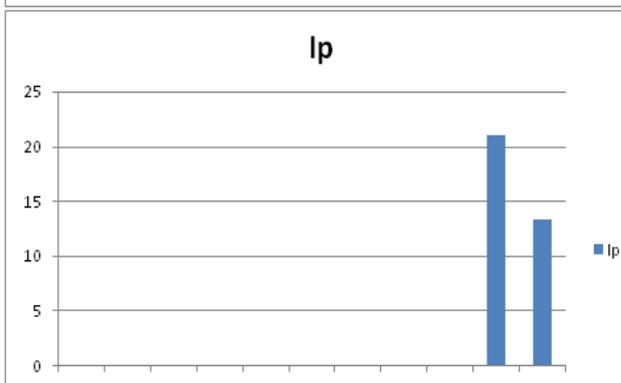
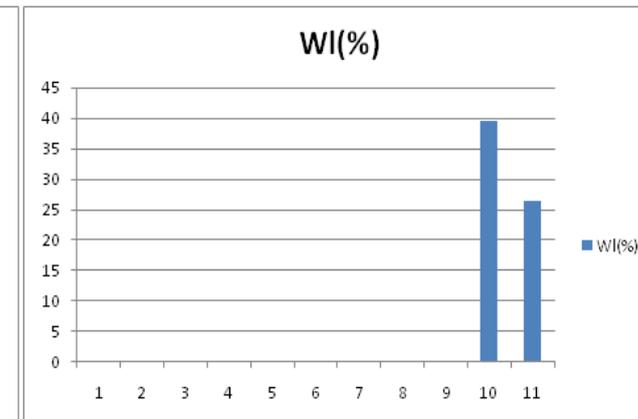
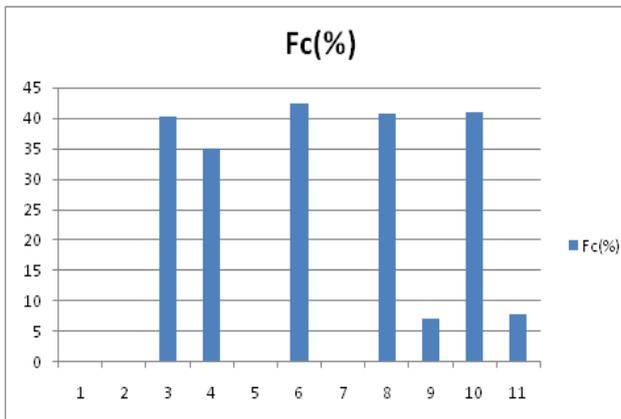
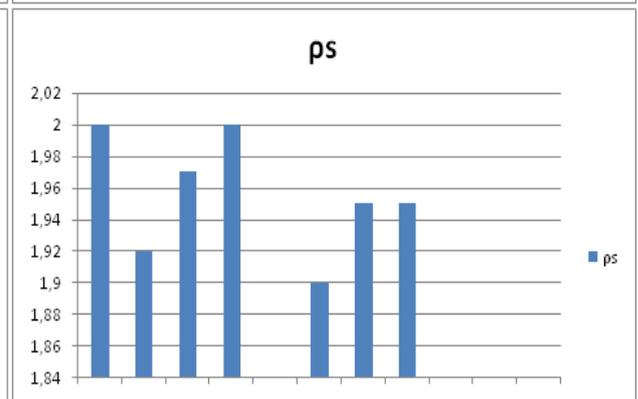
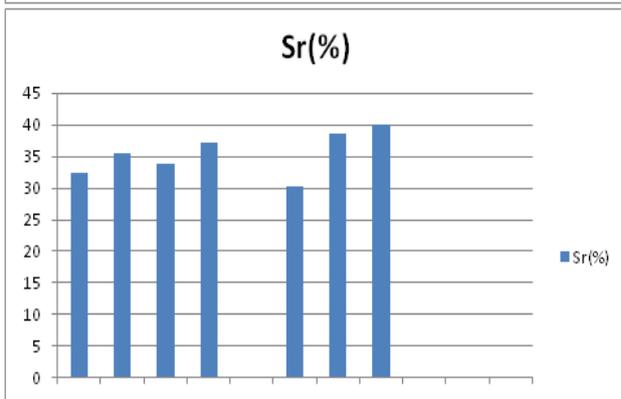
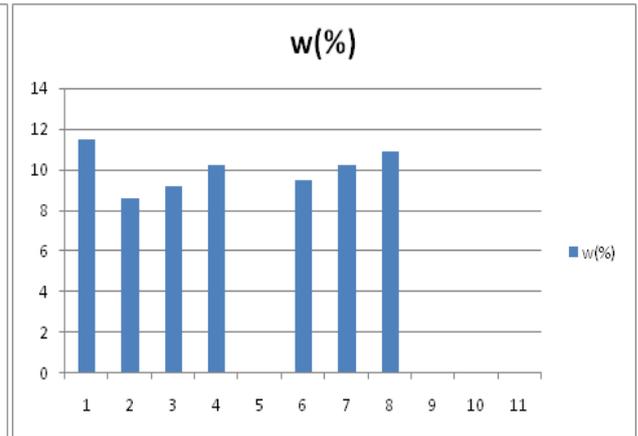
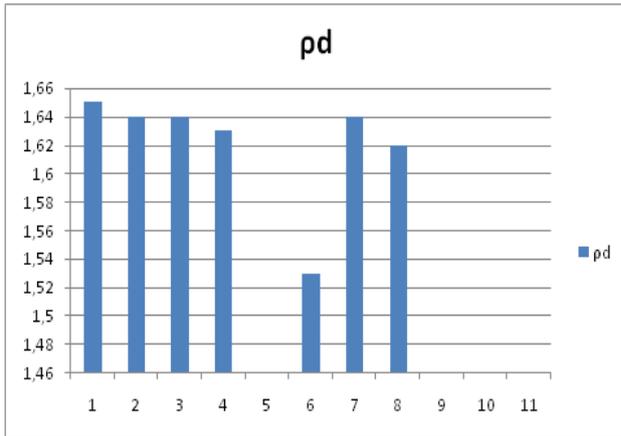
- Sol 17 : marne

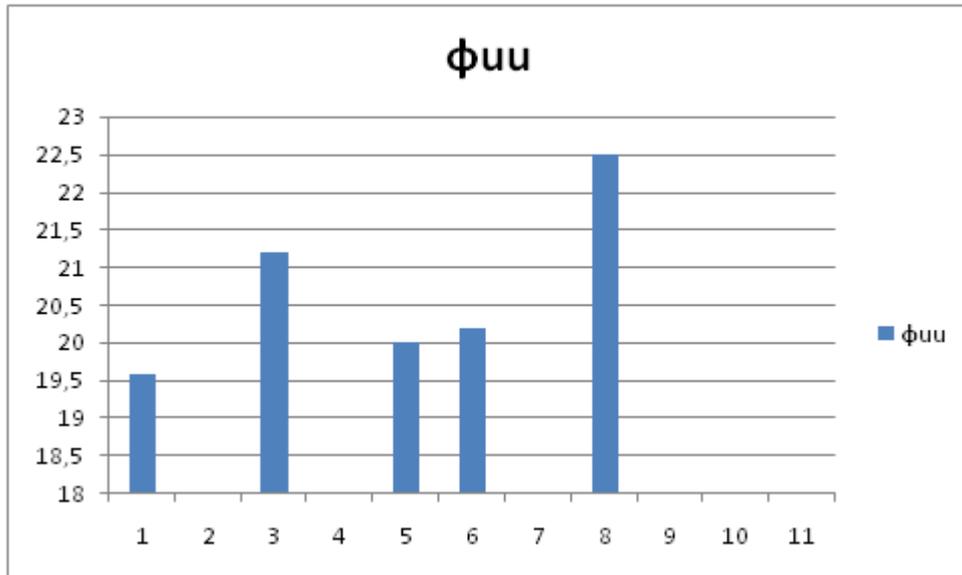




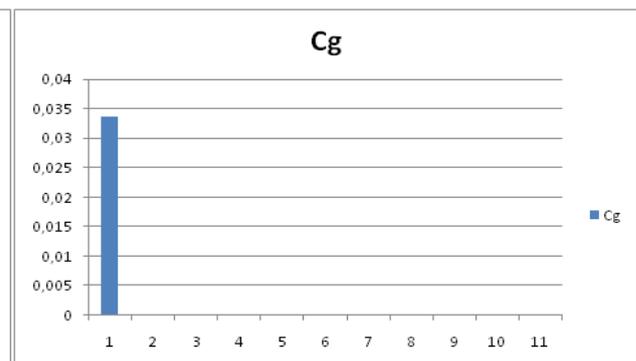
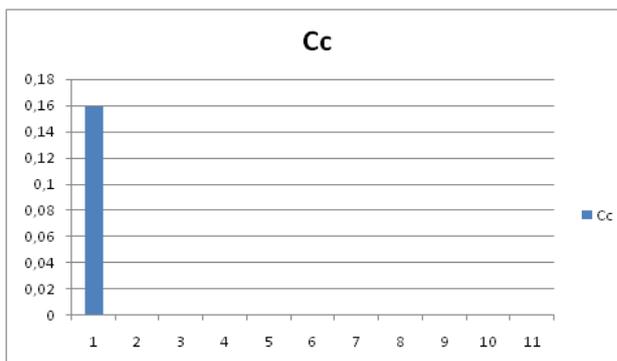
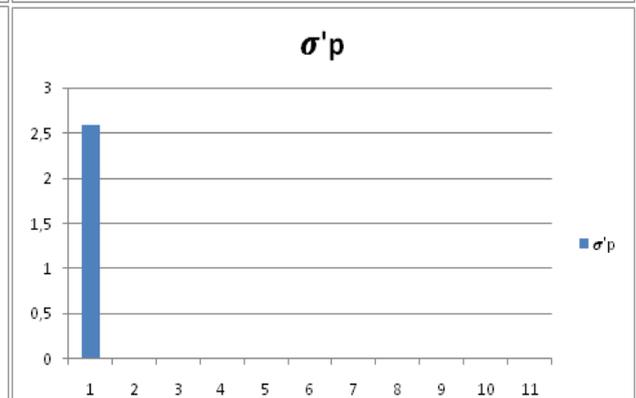
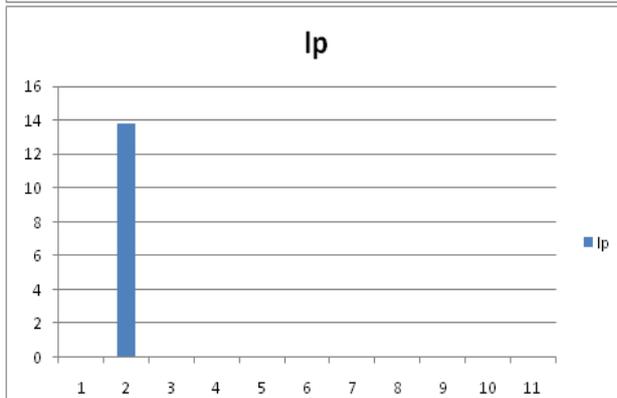
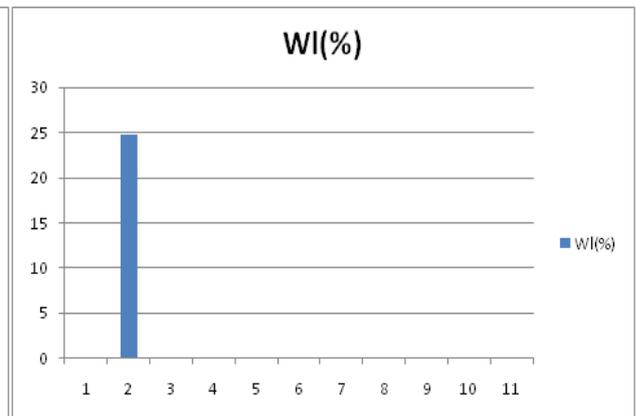
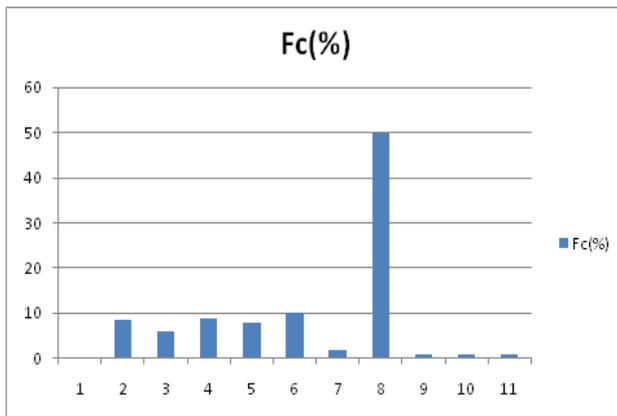


- Sol 18 : sable





- Sol 19 : sable fin



- Sol 20 : silitite

