

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

UNIVERSITE BADJI MOKHTAR - ANNABA  
BADJI MOKHTAR – ANNABA UNIVERSITY



جامعة باجي مختار – عنابة

Faculté : TECHNOLOGIE

Département : SCIENCES DE L'INGENIORAT

Domaine : SCIENCES ET TECHNOLOGIES

Filière : GENIE CIVIL.

Spécialité : GEOTECHNIQUE

## Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master

Thème:

**Etude Comparative de Comportement Mécanique d'un Sol  
Granulaire et d'un sol Fin Améliorés**

Présenté par : *Ouarti Assma*

*Nadji Chaima*

Encadrant : *Boukhatem Ghania*

*M.C.A*

*Université Badji Mokhtar\_ANNABA*

## Jury de Soutenance :

Nom et prénom	Grade	Université	Jury
Sbartai Badreddine	Grade	Université Badji Mokhtar	Président
Boukhatem Ghania	Grade	Université Badji Mokhtar	Encadrant
Rizi Djamila	Grade	Univesité Badji Mokhtar	Examineur

Année Universitaire : 2022/2023





# DEDICACE





*Je dédie ce travail*

*À ma famille, elle qui ma doté d'une éducation digne,  
son amour a fait de moi ce que je suis aujourd'hui :*

*À ma chère mère **Meriem**, À mon père  
**AbdelAziz***

*À mon chère marie **Lamine** pour leur patiente et  
leurs soutien et encouragement.*

*À mon chère fisse **Lyed** qui est le miel de ma vie.*

*À mon frère et mes sœurs **Salah, Asma,**  
**Bouchra, Jakwa***

*Puisse Dieu vous donne santé bonheur, courage et  
surtout réussite*

*À mon cher binôme **Asma** pour leur entente et sa  
sympathie **Nadji Chaima***

*Assma Ouari*







# Dédicace

*Du profond de mon cœur, je dédie ce travail à tous ceux qui me sont chers,*

*A ma chère mère :*

*Aucune dédicace ne saurait exprimer mon respect, mon amour éternel et ma considération pour les sacrifices que vous avez consenti pour mon instruction et mon bien être  
Je vous remercie pour tout le soutien et l'amour que vous me portez depuis mon enfance et j'espère que votre bénédiction m'accompagne toujours.*

*Que ce modeste travail soit l'exaucement de vos vœux tant formulés, le fruit de vos innombrables sacrifices. Puisse dieu, le très haut vous accorder santé, bonheur et longue vie.*

*A mon chère père :*

*Tu as toujours été à mes côtés pour soutenir et m'encourager. Rien au monde ne vaut les efforts fournis jour et nuit pour mon éducation, mon formation et mon bien être.*

*A mes chères frères : Ayoub, Arwa Anes*

*A ma chère binôme : chaima*

*pour sa entente et sa sympathie*

*A mes très chères sœurs :*

*Hala, Imen, Mériem, chaima, Mina, Douha ...les mots ne suffisent guère pour exprimer l'attachement, l'amour et l'affection que je porte pour vous. Vous aime.*

*A mes amis proches : Doudou, Chirin, Soumaya  
pour leurs aides et supports dans les moments difficiles*

*A toute ma familles*

*Assma Ouarti*





# Remerciements

Le grand remerciement revient à dieu qui nous a donné  
la

force et le courage de pouvoir terminer ce modeste  
travail.

En premier lieu, nous tenons à remercier  
chaleureusement madame **Boukhatem  
Ghania** maître de conférences classe A à l'université  
Badji Mokhtar Annaba pour son aide et son  
encadrement, ses encouragements et surtout sa  
compréhension durant toute la période de préparation  
de cette mémoire.

Merci à monsieur **Sbartai Badreddine** professeur à  
l'université d'Annaba qui nous a fait l'honneur d'accepté  
la présidence du jury de cette mémoire.

Merci également l'honorable jury Madame **Rizi Djamila**  
M.C.A à l'université  
d'Annaba qui a bien voulu examiner notre travail.

Un grand merci à tous les personnages du laboratoire  
LTP-EST Annaba qui ont  
contribué à rendre cette année mémorable, merci  
**ZEDIRA Nabil** chef service au laboratoire et leurs  
collègues.

Enfin, nous clôturons par remercier tous ceux qui ont de  
près ou de loin  
contribué à la réalisation de ce travail.





## *Liste des figures*

Figure	Titre
Figure.1.1	Caractéristique de sol.
Figure.1.2	Triangle des textures
Figure.1.3	un type d'argile
Figure.1.4	L'effet du gonflement de sol
Figure.1.5	Exemple d'un Tassement de sol
Figure.1.6	Exemple d'un glissement de sol
Figure.1.7	Types de compactage de surfa
Figure.1.8	Chantier d'un compactage dynamique profond.
Figure.1.9	Vibrocompactage
Figure.1.10	Déshydratation
Figure1.11	Travaux en souterrain : la congélation des sols.
Figure.1.12	Traitement par le ciment
Figure.1.13	Déchet de poudre de marbre
Figure.1.14	Déchets de pneus
Figure.1.15	
Figure 2.1	Test d'essai au bleu de méthylène
Figure 2.2	Courbe granulométrique
Figure 2.3	Courbe limite d'Atterberg pour sol naturel
Figure 2.4	Courbe de compactage (Essai Proctor normal) pour sol naturel.
Figure2.5	Courbe de 1 essai de cisaillement pour sol naturel
Figure2.6	Courbe de 2 essai de cisaillement pour sol naturel
Figure2.7	Courbe de 2 essai de cisaillement pour sol naturel
Figure 2.8	Essais CBR sur un sol naturel.
Figure 3.1	L'essai Proctor pour sol avec marbre _laboratoire(LTPE.Annaba).
Figure 3.2	Courbe de compactage (Essai Proctor normal) pour sol +3% marbre
Figure 3.3	Courbe de compactage (Essai Proctor normal) pour sol +6% marbre
Figure 3.4	Courbe de compactage (Essai Proctor normal) pour sol +9% marbre
Figure 3.5	: Courbe de compactage (Essai Proctor normal) pour sol +12% marbre
Figure 3.6	Courbe de compactage (Essai Proctor normal) pour sol



	+15% marbre
Figure 3.7	Courbe de compactage (Essai Proctor normal) pour sol +18% marbre
Figure 3.8	Limite d'Atterberge sol+3% Marbre
Figure 3.9	Limite d'Atterberge sol+6% Marbre
Figure3.10	Limite d'Atterberge sol+9% Marbre
Figure3.11	Limite d'Atterberge sol+12% Marbre
Figure3.12	Limite d'Atterberge sol+15% Marbre
Figure3.13	Limite d'Atterberge sol+18% Marbre
Figure3.14	Limite d'Atterberge sol+21% Marbre
Figure3.15	Limite d'Atterberge sol+24% Marbre
Figure3.16	Limite d'Atterberge sol+27% Marbre
Figure3.17	Limite d'Atterberge sol+30% Marbre
Figure.4.1	Graphique comparative des essais Proctor
Figure.4.2	Graphique comparative des essais CBR
Figure.4.3	Graphique comparative des essais CBR
Figure.4.4	Graphique comparative des essais limite d'atterberg entre WL,WP,IP.
Figure.4.5	Graphe de l'indice de consistance
Figure.4.6	Courbe essai CBR sable+9% marbre
Figure.4.7	Courbe essai CBR sable+12% marbre
Figure.4.8	Courbe essai CBR sable+15% marbre
Figure.4.9	Courbe essai CBR sable+18% marbre
Figure.4.10	Courbe essai CBR sable+21% marbre
Figure.4.11	Courbe résultats de l'essai de CBR mélange de Sable avec % marbre
Figure.4.12	Graphique comparative des essais limite d'atterberg entre WL,WP,IP.
Figure.4.13	Graphe de l'indice de consistance.

### *Liste des photos*

Photos	Titre
Photo2. 1	Situation de la zone de prélèvement Ain Soud Sidi Ammar (Annaba)
Photo2. 2	Appareillage de l'essai au bleu de méthylène
Photo2. 3	Essai au bleu de méthylène
Photo2. 4	Série de tamis
Photo2. 5	Echantillon de sols
Photo2. 6	Appareil Agitateur Automatique



Photo2. 7	Essai de Sédimentation au laboratoire
Photo2. 8	Sol naturel
Photo2. 9	Etuve.
Photo2. 10	Limite de liquidité à laboratoire (LTPE– Annaba)
Photo2. 11	limite de plasticité à laboratoire (LTPE-Annaba).
Photo2. 12	l’essai Proctor pour sol sans additives dans laboratoire(LTPE.Annaba)

## *Liste des tableaux*

Tableau	Titre
Tableau2. 1	Type de sol en fonction de la valeur de bleu de méthylène.
Tableau2. 2	Résultats de l’essai Granulométrie
Tableau2. 3	La norme française NF P18-560 utilisée notamment dans le domaine Types de sol selon la taille de la particule
Tableau2. 4	Les calculs d’essai sédimentation pour sol naturel.
Tableau2. 5	La Teneur en eau initial
Tableau2. 6	limite de liquidité pour sol naturel
Tableau2. 7	limite de plasticité sol pour sol naturel
Tableau2. 8	classification indice de plasticité et degré de plasticité
Tableau2. 9	Les résultats des paramètres de l’essai Proctor standard pour sol naturel.
Tableau2. 10	Les résultats des paramètres de l’essai Proctor standard pour sol naturel.
Tableau2. 11	Essai de cisaillage pour sol naturel.
Tableau2. 12	Les résultats de l’essai de CBR Sol naturel.
Tableau 3.1	Les résultats de l’essai Proctor pour sol (avec 3% marbre).
Tableau 3.2	Les résultats de l’essai Proctor pour sol (avec 6% marbre).
Tableau 3.3	Les résultats de l’essai Proctor pour sol (avec 9% marbre).
Tableau 3.4	Les résultats de l’essai Proctor pour sol (avec 12% marbre).
Tableau 3.5	Les résultats de l’essai Proctor pour sol (avec 15% marbre).
Tableau 3.6	Les résultats de l’essai Proctor pour sol (avec 18% marbre).
Tableau3.7	Essai de cisaillage Sol +3% Marbre
Tableau3.8	Essai de cisaillage Sol +6% Marbre
Tableau3.9	Essai de cisaillage Sol +9% Marbre
Tableau3.10	Essai de cisaillage Sol +12% Marbre
Tableau3.11	Essai de cisaillage Sol +15% Marbre



Tableau 3.12	Essai de cisaillement Sol +18% Marbre.
Tableau 3.13	Essai de cisaillement Sol +21% Marbre.
Tableau 3.14	Essai de cisaillement Sol +24% Marbre
Tableau 3.15	Essai de cisaillement Sol +27% Marbre
Tableau 3.16	Essai de cisaillement Sol +30% Marbre
Tableau3.17	limite de liquidité pour sol + 3% Marbre
Tableau3.18	limite de plasticité pour sol + 3% Marbre
Tableau3.19	limite de liquidité pour sol + 6% Marbre.
Tableau 3.20	limite de plasticité sol + 6% Marbre
Tableau3.21	limite de liquidité pour sol + 9% Marbre
Tableau 3.22	: limite de plasticité sol + 9% Marbre
Tableau3.23	limite de liquidité pour sol + 12% Marbre
Tableau 3.24	limite de plasticité sol + 12% Marbre
Tableau3.25	limite de liquidité pour sol + 15% Marbre.
Tableau 3.26	limite de plasticité sol + 15% Marbre
Tableau3.27	limite de liquidité pour sol + 18% Marbre.
Tableau 3.28	limite de plasticité sol + 18% Marbre
Tableau3.29	limite de liquidité pour sol + 21% Marbre.
Tableau3.30	limite de liquidité pour sol + 21% Marbre.
Tableau3.31	limite de plasticité sol + 21% Marbre
Tableau3.32	limite de liquidité pour sol + 24% Marbre.
Tableau3.33	limite de plasticité sol + 24% Marbre
Tableau3.34	limite de liquidité pour sol + 27% Marbre.
Tableau3.35	limite de plasticité sol + 27% Marbre
Tableau3.36	limite de liquidité pour sol + 30% Marbre
Tableau3.37	limite de plasticité sol + 30% Marbre
Tableau 3.37	Les résultats de l'essai de CBR Sol + 3% marbre
Tableau 3.38	Les résultats de l'essai de CBR Sol + 6% marbre
Tableau3.39	Les résultats de l'essai de CBR Sol + 9% marbre
Tableau3.40	Les résultats de l'essai de CBR Sol + 12% marbre
Tableau3.41	Les résultats de l'essai de CBR Sol + 15% marbre
Tableau3.42	Les résultats de l'essai de CBR Sol + 18% marbre
Tableau3.43	Les résultats de l'essai de CBR Sol + 21% marbre
Tableau3.44	Les résultats de l'essai de CBR Sol + 24% marbre
Tableau3.45	Les résultats de l'essai de CBR Sol + 27% marbre
Tableau3.46	Les résultats de l'essai de CBR Sol + 30% marbre
<b>Chapitre4</b>	
Tableau.4.1	Variation de la masse volumique sèche en fonction des pourcentages de Marbre
Tableau.4.2	Les résultats des paramètres de l'essai Proctor la masse sèche en fonction de Marbre.
Tableau.4.3	Les résultats des paramètres de l'essai cisaillement la cohésion et l'angle de frottement



Tableau 4.4	le tableau présenteL'indice Portant CBR.
Tableau 4.5	Les résultats de l'essai de CBR Sable naturel
Tableau 4.6	Les résultats de l'essai de CBR (Sable + 3% Marbre)
Tableau 4.7	Les résultats de l'essai de CBR (Sable + 6% Marbre)
Tableau 4.8	Les résultats de l'essai de CBR (Sable + 9% Marbre)
Tableau 4.9	Les résultats de l'essai de CBR (Sable + 12% Marbre)
Tableau 4.10	Les résultats de l'essai de CBR (Sable + 15% Marbre)
Tableau 4.11	Les résultats de l'essai de CBR (Sable + 18% Marbre)
Tableau 4.11	Les résultats de l'essai de CBR (Sable + 18% Marbre)



## Sommaire

<b>Introduction générale .....</b>	<b>3</b>
1. Introduction.....	5
2. Les Sols .....	5
a) Définition d'un sol : .....	5
b) Définition géotechnique des sols:.....	5
c) Caractéristique mécanique des sols :.....	5
3. Type de sol.....	6
4. Propriétés du sol.....	6
5. Classification des sols .....	7
6. Définition de l'argile .....	8
7. Définition de Sable .....	9
8. Les sols problématiques .....	9
a)Phénomène de gonflement :.....	9
b)Tassements :.....	10
c)Glissements ; .....	10
9. Méthodes de traitement des problèmes de sol .....	11
9.1Méthodes mécaniques : : .....	11
a)Compactage de surface :.....	11
9.3. Méthodes chimiques :.....	13
9.3.1.Utilisation de la chaux : .....	14
9.3.2 :Utilisation du ciment : .....	14
9.3.3. Utilisation du marbre : .....	15
9.3.4 : Utilisation des pneus :.....	15
Conclusion : .....	16
1. Introduction .....	19
2. Sol naturel .....	19
2.1. Les essais réalisés sur le sol naturel : .....	19
2.1.1. Les essais chimiques : .....	19
A. Essai bleu de méthylène NF P 94-068 : .....	20
2.1.2. Les essais Physiques : .....	22
A. La Granulométrie :.....	22
B. L'essai de granulométrie par sédimentation :.....	24



C. Essai teneur en eau (NF-P94-050) :	26
D. Essais d'Atterberg :	28
2.1.3. Essais mécanique	31
A. L'essai Proctor :	31
Mode opératoire :	31
B. L'essai de cisaillement direct non consolidé non drainé UU :(NF P94-071).	33
C. Essai de CBR :(California Bearing Ratiotest) Norme NF P 94-07 :	37
3. Conclusion :	39
1. Introduction	41
2. Le Marbre	41
3. Les essais effectués sur le sol + Marbre	42
3.2 Essai de CBR:	88
1. Introduction	97
3.Essai Cisaillement	98
4. Essai CBR	99
4.1 Essai CBR pour l'argile :	99
4.2Essai CBR pour le sable:	101
5.Essai de limite d'Atterberg	108
Conclusion :	110



## *Abréviations et symboles*

<b>Symbole</b>	<b>Abréviation</b>
<b>Mm</b>	Micro Millimètre
<b>C</b>	Cohésion
<b><math>\Phi</math></b>	Angle De Frottement Interne
<b>Mm</b>	Millimètre
<b><math>\tau</math></b>	Contrainte De Cisaillement
<b>CBR</b>	California Bearing Ratiotest
<b>IPI</b>	L'indice Portant Immédiat / CBR
<b>VBS</b>	Volume total de solution injectée /masse
<b>W</b>	Teneur En Eau
<b>Kg</b>	Kilogramme
<b>WL</b>	Limite De Liquidité
<b>Wp</b>	Limite De Plasticité
<b>IP</b>	L'indice De Plasticité
<b>IC</b>	L'indice De Consistance



## *Sommaire*



## **RESUME**

Les propriétés des sols ne pourraient pas toujours répondre aux exigences de l'ouvrage à construire, plusieurs méthodes de traitement pour améliorer les propriétés géotechniques des sols existent, notre étude consiste à examiner la possibilité d'utiliser la poudre de marbre pour améliorer les propriétés géotechniques des sols problématique et d'évaluer expérimentalement l'impact de ce produit sur la résistance du sol. L'étude vise à comparer le comportement mécanique des sols granulaires et fins qui ont été améliorés. L'amélioration des sols avec un tel déchet récupéré lors de la coupe et le polissage du marbre est facile à mettre en œuvre, économique, peu coûteuse et aide à protéger l'environnement, une série d'essais a été effectuée sur des échantillons de deux types de sols avec et sans ajouts de poudre de marbre à différents pourcentages variant de 0% jusqu'à 30%, et les résultats sont vraiment encourageants.

### **Mots-clés:**

Poudre de marbre, amélioration des sols, sol fin, sol granulaire.

## **تلخيص**

لا يمكن أن تلبي خصائص التربة

دائمًا متطلبات العمل، لحل هذه المشكلة، نستخدم طرق المعالجة لتحسين الخصائص الجيوتقنية للتربة التي نواجهها.

الهدف الرئيسي من هذه الدراسة هو دراسة إمكانية استخدام مسحوق الرخام لتحسين الخصائص الجيوتقنية للتربة ذات المشاكل وتقييم تأثير هذا المنتج على مقاومة التربة بشكل تجريبي.

إن تحسين الأرضيات بهذه النفايات التي يتم استردادها أثناء تقطيع وتلميع الرخام أمر سهل التنفيذ واقتصادي وغير مكلف ويساعد على حماية البيئة إلى 0٪. في هذه الدراسة، تم إجراء سلسلة من الاختبارات على عينات من نوعين من التربة مع وبدون إضافات من مسحوق الرخام بنسب مختلفة تتراوح من 0٪ إلى 30٪، ... ..

### **الكلمات الدالة**

مسحوق الرخام، تحسين التربة، التربة الناعمة، التربة الحبيبية.

## **SUMMARY**

The properties of the soils could not always meet the requirements of the work, to solve this problem, we use treatment methods to improve the geotechnical properties of the soils encountered. The main objective of this study is to examine the possibility of using marble powder to improve the geotechnical properties of problematic soils and to experimentally evaluate the impact of this product on soil resistance. Improving floors with such waste recovered during the cutting and polishing of marble is easy to implement, economical, inexpensive and helps protect the environment. In this study, a series of tests was carried out on samples of two types of soil with and without additions of marble powder at different percentages ranging from 0% to 30%, .....

Key words:



marble powder, soil improvement, fine soil, granular soil.

A decorative scroll frame with a dark blue outline. It features a vertical scroll on the left side and a horizontal scroll on the top right corner. The text "Introduction général" is centered within the frame.

## Introduction général



## Introduction générale

La stabilisation des sols est l'une des principales activités des ingénieurs géotechniciens. Ce terme désigne un ensemble de procédés qui ont pour but d'améliorer la résistance des sols et /ou de limiter les déformations sous des ouvrages existants. Par ailleurs, le renforcement des sols de fondations ou remblais consiste en l'amélioration de sa capacité de supporter les différents types de charges (permanentes, d'exploitations ou celles dues à l'eau). En géotechnique, plusieurs techniques sont utilisées pour améliorer les sols. Elles sont basées parfois sur un processus purement chimique (addition de poudre de marbre ; ciment, chaux, cendres volantes, laitier,...) ou à travers une approche mécanique (incorporation des éléments ou renforts relativement rigides).

Cependant, le choix entre ces méthodes dépend du type de sol à traiter, la nature du projet et le chargement appliqué (type et intensité), des moyens disponibles et dans certains cas des raisons liées à l'environnement, conventionnellement, le premier type de techniques est généralement considéré comme stabilisation alors que le second est un renforcement.

Cette étude a été effectuée pour mieux comprendre le comportement à la durabilité des sols argileux traités à la poudre de marbre en constituant quatre chapitres : chapitre



A decorative frame shaped like a horizontal scroll. It has a black outline with rounded ends. On the left side, there is a vertical strip that tapers at the top and bottom, with a small circular loop at the top. On the right side, there is a small circular loop at the top.

# Chapitre 1

## Généralité sur les sols



### 1. Introduction

Avec la réduction des ressources foncières disponibles de plus en plus de constructions d'ouvrages de génie civil sont réalisées sur des sols faibles ou mous, ce qui conduit à la mise en place et au développement de diverses techniques d'amélioration des propriétés géotechniques des sols pour répondre aux exigences de stabilité mécanique et de réduction des coûts de maintenance .

La réutilisation des matériaux locaux dans la construction rencontre des difficultés à cause de leurs propriétés qui ne pourraient pas répondre aux exigences de l'ouvrage. Pour résoudre ce problème, on utilise des méthodes du traitement des sols pour améliorer les propriétés géotechniques des sols rencontrés sur le site ou en utilisant divers additifs tels que le ciment, la chaux, les cendres volantes, la fumée de silice etc. La présente étude a examiné la possibilité d'utiliser la poudre de marbre pour améliorer les propriétés géotechniques des sols problématiques.

### 2. Les Sols

#### a) Définition d'un sol :

Dans les études géotechniques les matériaux existant à la surface de l'écorce terrestre sont classés en deux grandes catégories:

- Roches : agrégats de particules minérales maintenues ensemble par de fortes forces de cohésion, permanent même après un trempage prolongé dans l'eau ou les pierres. - Sol : ensemble de particules minérales séparables par action mécanique relativement faible > mécanique des sols. Substances migrées entre le sol et la roche. Il est appelé SIRT (sol dur et roche tendre). Notez que les géologues appellent le sol "sol". Toutes les substances qui existent à la surface de la croûte terrestre. Le sol est le matériau lâche, poreux, hétérogène et souvent anisotrope. Matière minérale ou organique, Généralement sous forme de granulés ou de particules de différentes formes et tailles fondamentalement variable.

#### b) Définition géotechnique des sols:

L'ingénierie géotechnique est l'étude des sols directement liée à la construction d'ouvrages. Elle traite de l'interaction entre le sol et la structure et couvre les fondamentaux de la géologie, de la mécanique des sols, de la mécanique des roches et de la structure.

#### c) Caractéristique mécanique des sols :





**Figure.1.1** :Caractéristique de sol.

- **Les phases solides (sol)** sont également appelées solides ou particules, abrégées en « s » en notation mathématique.
- **La phase liquide (eau)** est principalement constituée d'eau au sens usuel. Abrégé en « w ».
- **La phase gazeuse (air)** est généralement constituée d'air. Le cas du gaz naturel sous pression n'a pas été étudié initialement. Le poids de l'air est ignoré dans les calculs.

### 3. Type de sol

Les sols sont principalement divisés en:

- a) **Sol friable** : Il fait référence à des substances collantes ou incohérentes qui s'effritent de la surface de la croûte terrestre
- b) **Sol non émiétté** : Ce sont des roches qui se solidifient en permanence et ce type de sol a une capacité portante (charge) très élevée.

### 4. Propriétés du sol

La texture et la structure du sol dépendent de ses principales propriétés : porosité, aération, perméabilité et rétention d'eau

L'aération est fortement liée à la porosité du sol. La porosité du sol est le volume total des interstices entre les agrégats ou les particules solides.

- a) **Les sols sableux** : Un sol sablonneux est composé à plus de **60%** de sable, c'est donc un sol sec qui ne retient pas l'humidité.

Le sable est une substance granuleuse composée de petites particules résultant de la décomposition de substances d'origine minérale (essentiellement des roches) ou d'origine organique (coquillages, squelettes de coraux, etc.).

- b) **Les sols argileux** : sont constitués de **40 %** ou plus d'argile. Les sols argileux, composés d'argiles granulaires et minéralogiques, peuvent poser des problèmes tels que la formation de couches de sol imperméables, lourdes et cohésives.



c) **Les sols Limoneux** : contiennent plus de **35 %** de limon et moins de **10 %** d'argile.

## 5. Classification des sols

### a) Sols granuleux :

Un sol granuleux signifie du gravier, du sable ou du limon (sol à gros grains) avec peu ou pas d'argile. Le sol granuleux est non cohésif. Certains sols granuleux humides montrent une cohésion évidente.

### b) Sols à grains fins :

La saleté fine signifie que les particules individuelles ne sont pas visibles à l'œil nu. La taille des particules fissurées est de 75-2 microns de diamètre et les particules de moins de 2 microns de diamètre sont appelées argile. Classe 1 : valeur limite supposée : 20  $\mu\text{m}$  Sols granuleux  $d > 20 \mu\text{m}$  Sols fins  $d < 20 \mu\text{m}$  Galets, graviers, sables Limons, argiles

- **Blocs**, cailloux, galets (fragments de roche hôte) : gravats, alluvions grossières, moraine 20 mm mm.
- **Grave** (fragments de roche hôte) : Dépôts de fragments multi-minéraux, généralement 2 mm  $< d < 20$  mm.
- **Sable** (fragment de roche hôte) : Dépôts de fragments généralement composés d'un minéral : 20  $\mu\text{m} < d < 2$  mm.
- **Limon** (roche mère) : mélange de sable très fin, généralement mélangé à des particules d'argile : 2  $\mu\text{m}$
- **Argiles** (altérations physico-chimiques de certains minéraux rocheux) : particules  $< 2 \mu\text{m}$ . [4]

### c) Différence entre sol à grains fins et sol granuleux :

#### Sol grossier (pulvérulents) - sol fin :

Attraction interarticulaire (force électrique, force de van der Waal, etc.). Affecte le comportement des sols contenant de très petites particules. dans ce cas le sol est collant. Il existe deux catégories de sols :

#### • Sol fin cohésif (ou sol collant) $d < 20 \mu\text{m}$ (argiles, limon) :

Comportement très différent selon le taux d'humidité (état solide, plastique ou liquide)

#### • Sols granuleux non cohésifs avec $d > 20 \mu\text{m}$ (sable, gravier, etc.) :

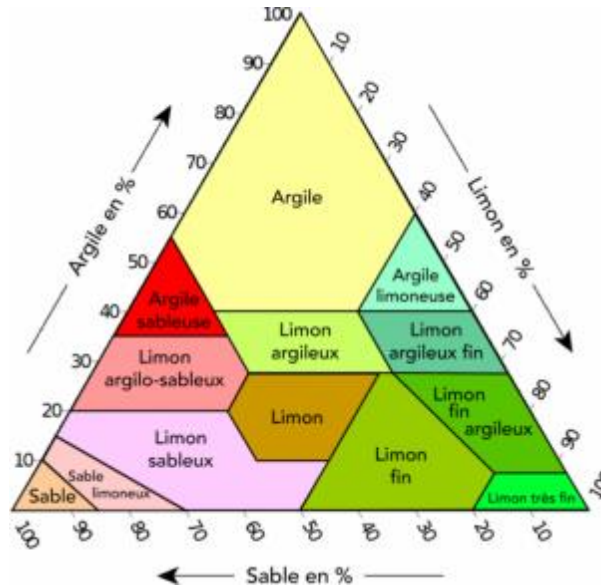
Le comportement est déterminé par les propriétés du squelette solide (l'eau a peu d'effet).

En réalité, le sol est constitué d'un mélange de particules de différentes tailles. En d'autres termes, il s'agit d'un état intermédiaire entre un sol granuleux et un sol à grains fins.



**d) But de classement :**

Cependant, afin de résoudre le problème de mécanique des sols, il est important de caractériser le sol. Vous pouvez également les catégoriser, c'est-à-dire les placer dans des groupes qui se comportent de la même manière. Il existe de nombreuses classifications dans le monde. Identification visuelle généralement simple. Les matériaux peuvent être nommés : marne bleue, argile jaune, sable fin.



**Figure.1.2 :** Triangle des textures. Source

## 6. Définition de l'argile

L'argile est une roche sédimentaire composée essentiellement de minéraux, des agrégats décomposés contenant des aluminosilicates hydratés issus de la décomposition des feldspaths comme le granite. Le minéral se caractérise par une granulométrie inférieure à  $3,9 \mu\text{m}$ .



**Figure.1.3:** un type d'argile



### **Types et classement :**

Les argiles peuvent être classées selon plusieurs facteurs. Par conséquent, selon le processus géologique qui les a produits et la localisation des sédiments dans lesquels ils se trouvent, ils sont classés comme suit : Argile primaire : Ce nom est utilisé lorsque le gisement trouvé est le même que celui où il s'est formé. Le kaolin est la seule argile primaire connue. Argiles secondaires : elles ont été déplacées par des forces physiques ou chimiques après leur formation. Il s'agit notamment du kaolin secondaire, de la chamotte, de l'argile plastique, de l'argile de surface et du grès. En regardant la structure de ses constituants, nous pouvons distinguer l'argile Phyllis de l'argile fibreuse. L'argile se distingue également par sa plasticité. Il existe donc des argiles plastiques (comme la kaolinite) et de petites quantités de plastique (comme les smectiques qui absorbent les graisses). Enfin, il existe des argiles calcaires, des argiles à blocs (argiles, graviers et roches de moraine), des argiles déminéralisées et des argiles (schistes). Le kunkar est une argile dure qui ressemble à de la pierre.

### **7. Définition de Sable**

Le sable est un matériau granulaire composé de particules (quartz, micas, feldspaths) issues de la dégradation de roches. La dimension des grains de sable est comprise entre  $1/16^{\circ}$  de millimètre et 2 millimètres.

### **8. Les sols problématiques**

#### **En Algérie, l'urbanisation et la construction de routes dans certaines zones se heurtent**

A propos des problèmes de phénomènes de gonflement, de durcissement et de glissement. Par conséquent, les ingénieurs géotechniciens sont confrontés à de nombreux problèmes liés aux risques potentiels qui peuvent être éliminés par des études géotechniques. Le surdimensionnement inutile du système de fondation entraîne des coûts supplémentaires pendant la phase de construction. Nous effectuons d'analyses de sol pour connaître les propriétés physiques et chimiques du sol souhaité, s'il convient à la construction, s'il y a des problèmes, et identifier et résoudre les problèmes.

Choisissez une bonne entreprise géotechnique, une entreprise d'ingénierie qui embauche un ingénieur en sciences du sol pour déterminer le type de sol, son état et si des traitements sont nécessaires avant le début de la construction. Ces contaminants nuisent à la structure des bâtiments en construction.

#### **a)Phénomène de gonflement :**

Ce phénomène est lié aux variations d'humidité de certains sols très argileux ou tourbeux, qui peuvent retenir l'humidité disponible, mais peuvent aussi perdre de l'eau en reculant lorsqu'ils sont secs.

Le gonflement est le comportement différentiel de sédimentation des sols propre aux sols argileux (les argiles gonflent et varient avec la teneur en eau). Le changement de volume du sol provoque une turbulence du sol avec l'interaction des saisons sèches et structures (fissures, délaminage des éléments adjacents).





**Figure.1.4 :** L'effet du gonflement de sol

**b)Tassements :**

Il s'agit de la réduction de volume de certains sols très compressibles (boue, tourbe, argile). Sous l'action des charges appliquées et de l'abaissement de la nappe phréatique Utilisez trop.



**Figure.1.5 :**Exemple d'un Tassement de sol

**c)Glissements :**

Ces mouvements, au sens le plus large, consistent en des déplacements plus ou moins continus de montagnes et de collines instables. Le mouvement peut être causé par la gravité, des forces externes (hydrauliques ou sismiques) ou des changements dans les conditions aux limites. Des morceaux fracturés de matériau meuble ou rocheux se brisent le long d'un ou plusieurs plans de fracture par cisaillement. Cela correspond souvent à des discontinuités existantes de formes variées, visibles ou non.





**Figure.1.6 :**Exemple d'un glissement de sol

## 9. Méthodes de traitement des problèmes de sol

Les méthodes de traitement des sols consistent à modifier physiquement et/ou chimiquement les propriétés du sol afin de corriger les défauts du sol et d'améliorer ses propriétés. Il existe différentes techniques de traitement des sols.

**9.1Méthodes mécaniques :**Trois méthodes de stabilisation mécanique sont énumérées ci-dessous :

### a)Compactage de surface :

Le compactage est le processus de compactage du sol existant.Ce processus réduit mécaniquement la porosité du sol.Cela augmente non seulement la densité et la résistance, mais réduit également la résistance.Compressible.



**Figure.1.7 :** Types de compactage de surface.

Des rouleaux spéciaux sont utilisés pour charger le sol compacté. Le compactage statique ou vibratoire provoque le compactage du sol proportionnel à l'énergie mécanique appliquée. La densification de surface peut être obtenue sur différents types de sites Web.

### b) Compactage dynamique :

Le compactage dynamique est utilisé pour les profondeurs supérieures à 3 m. c'est un processus. Il consiste à piétiner le sol avec une femme en chute libre. L'énergie transmise par chaque impact pénètre le sol et provoque des destructions. Quelques jours plus tard, ou la reconstruction se déroule sur plusieurs semaines pour améliorer les caractéristiques de flottabilité. Cette procédure s'applique aux sols de gravier sablonneux et aux matériaux de limon argileux saturés. Mais seulement si des poches d'air sont présentes. Il pourrait être intéressant de consolider l'utilisation d'écouche inférieure d'eau.





**Figure1.8 :**Chantier d'un compactage dynamique profond.

### c) Vibrocompactage

Ces vibrations, émises par l'outil, se propagent de grains en grains et provoquent un réarrangement optimal du volume initial occupé. Les vibrations engendrent un phénomène localisé de liquéfaction sous l'effet des surpressions interstitielles qui met les grains du sol dans un état liquéfié. Les grains se réarrangent en un état plus dense.



**Figure.1.9 :**Vibrocompactage.

### 9.2.Méthodes thermiques :

**a)Déshydratation :**La déshydratation thermique est rarement utilisée en géotechnique, mais elle permet : Par exemple, il durcit certaines argiles.En pratique, cette méthode consiste à brûler du carburant.Les puits adjacents sont utilisés pour communiquer avec le premier puits et agissent comme une cheminée de tirage.





**Figure.1.10 :**Déshydratation

### **b) Congélation :**

Le gel d'un sol instable est un processus ancien et transitoire Utilisé pour creuser des puits et des tunnels. Temporairement étanche et durable. Il sera temporairement amélioré tant que le gel se poursuivra. Effet d'imperméabilisation du sol et de facilitation des travaux de terrassement et de construction sous la nappe phréatique. La technologie de réfrigération utilisée est basée sur la circulation de liquide froid. Un tuyau est enfoncé dans un bloc de terre. Il est souhaitable que le sol soit complètement saturé.



**Figure.1.11 :**Travaux en souterrain : la congélation des sols.

### **9.3. Méthodes chimiques :**

La stabilisation chimique est une technique intéressante pour améliorer les propriétés physiques et mécaniques des sols argileux. Une grande variété de produits et de technologies sont fabriqués aujourd'hui. Il fait partie de la pratique courante dans les grands travaux de génie civil à l'échelle mondiale. En utilisant largement cette technologie pour améliorer les matériaux existants. Les importantes économies de coûts sont principalement dues aux facteurs suivant :

L'absence de substances précieuses dans la nature. Des préoccupations écologiques croissantes Protéger les ressources naturelles existantes d'une part et les limiter d'autre part Dépôt de matériaux impropres à la réutilisation dans les remblais ou les revêtements. Ajout



Les produits chimiques les plus couramment utilisés dans le ciment sont le ciment, la chaux et les cendres. Le but principal du mélange d'additifs cimentaires dans le sol est l'amélioration du sol. Ses propriétés mécaniques physiques et sa durabilité. Diverses propriétés qui peuvent être améliorées comprennent la résistance, la plasticité.

### 9.3.1. Utilisation de la chaux :

L'utilisation de la chaux pour stabiliser l'argile est utilisée avec beaucoup de succès depuis des décennies. Par exemple, dans certains cas, les sols stabilisés à la chaux offrent des performances structurelles comparables aux fondations en gravier naturel ou en pierre concassée. En général, la chaux vive est plus efficace que la chaux éteinte pour l'amélioration des sols. La chaux est plus efficace dans les sols argileux que dans les sols granuleux.



**Figure.1.12** : Traitement par la chaux

### 9.3.2 : Utilisation du ciment :

Le ciment Portland est un autre produit à considérer pour stabiliser une catégorie spécifique de sol utilisé pour les surfaces des routes et des pistes des aéroports. Au fur et à mesure que les ions calcium sont libérés, ils sont disponibles pour stabiliser l'argile. La figure ci-dessous montre un site de traitement de sol en ciment. Le ciment Portland possède donc des propriétés supérieures à la chaux : hydratation par cimentation.



**Figure.1.13** : Traitement par le ciment



### 9.3.3. Utilisation du marbre :

Le marbre est une roche métamorphique formée de calcaire ou de dolomite. Les roches sédimentaires ont généralement subi plus qu'un métamorphisme régional. Dans de rares cas, le métamorphisme de contact est également impliqué. Au cours de cette transformation, la roche d'origine, structure sédimentaire effacée, roche carbonatée enlevée, se recristallise en amas de cristaux entrelacés de calcite et/ou de dolomite de tailles variables de millimètres à centimètres.



**Figure.1.14 : Déchet de poudre de marbre**

### 9.3.4 : Utilisation des pneus :

Bien que les déchets de pneumatiques soient classés comme déchets non dangereux, ils peuvent présenter des risques pour l'environnement et la santé publique s'ils sont pris dans un incendie (émission de fumées toxiques) ou s'ils sont déversés illégalement (terreaux de reproduction de moustiques porteurs de virus)... Il y a deux raisons de traiter le sol avec des pneus usagés. A encore besoin d'être amélioré. sol trop humide. Qu'il s'agisse d'un sol qui existe déjà pour poursuivre les travaux ou qui est réutilisé comme remblai, ou d'une plateforme robuste et stable pour la gestion de la construction et l'installation des fondations lors de conditions météorologiques défavorables, créer.



**Figure.1.15 : Déchets de pneus**



### **Conclusion :**

Le traitement du sol est le processus d'ajout de matières premières telles que: Chaux, ciment ou produits chimiques hydrauliques pour améliorer la résistance des sols qui ne peuvent pas résister à l'état naturel. L' utilisation de chutes de marbre a donné des résultats positifs pour l'augmentations de la résilience des sols d'une part et le recyclage (conservation) de ces déchets d'autre part,à coût économique et un bon impact environnemental. Pour cette raison, nous avons décidé d'étudier le traitement du sol avec l'ajout de déchets de poussière.





# Chapitre2

**Sol étudié**







## 1. Introduction

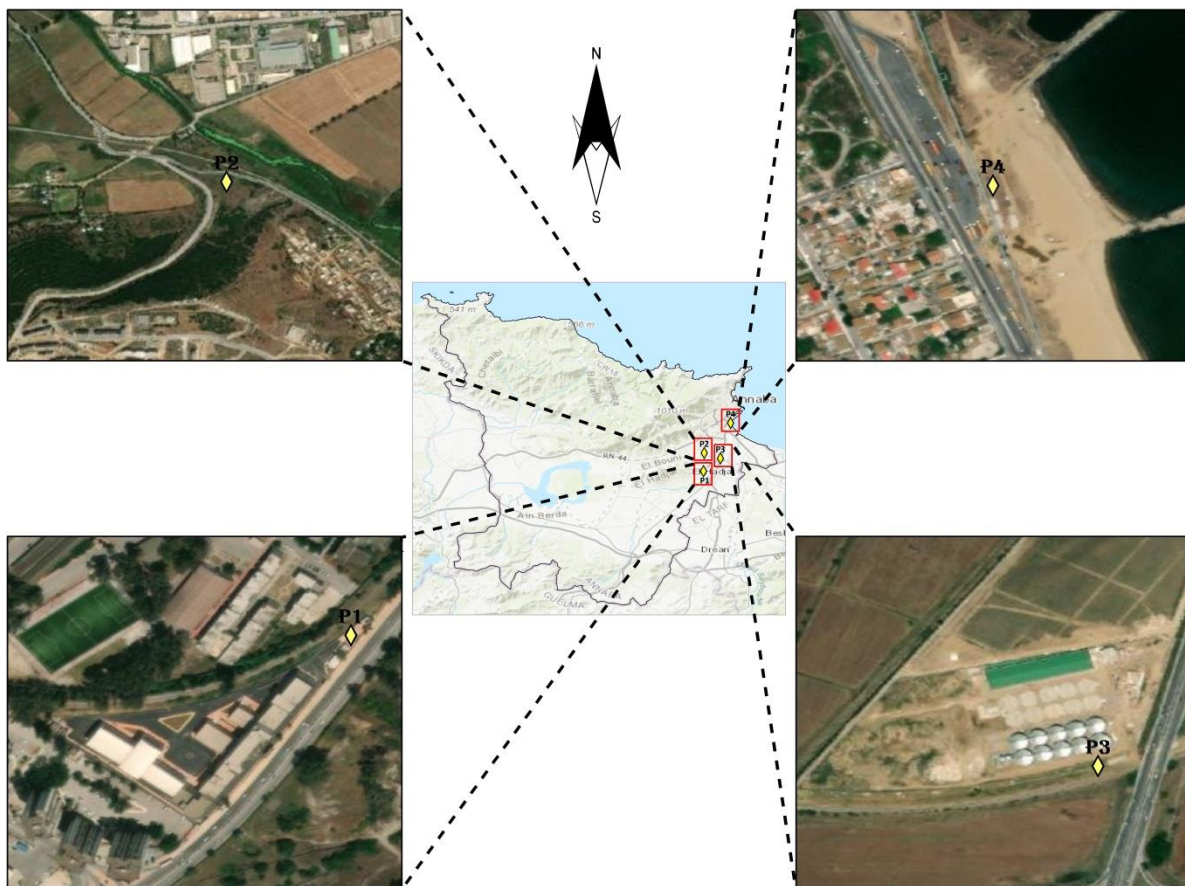
Ce chapitre concerne l'étude expérimentale effectuée au laboratoire LTP EST Annaba selon les modes opératoires résumées dans le chapitre 2.

L'objectif de ce chapitre est de caractériser le sol selon les essais suivants :

- Essais chimiques (Bleu de méthylène).
- Essais physiques (Granulométrie par tamisage et par sédimentation, teneur en eau, limite d'Atterberg)
- Essais mécaniques (Proctor, cisaillement et CBR).

## 2. Sol naturel

Le sol étudié est extrait du site de Annaba (Nord-est d'Algérie), c'est une argile provenant d'un gisement des sites Ain chehoud Sidi Ammar.



**Photo2. 1 :** Situation de la zone de prélèvement Ain chehoud Sidi Ammar (Annaba)

### 2.1. Les essais réalisés sur le sol naturel :

#### 2.1.1. Les essais chimiques :



### **A. Essai bleu de méthylène NF P 94-068 :**

Le but de l'essai est de mesurer la quantité de bleu de méthylène nécessaire pour saturer un sol. Cette dernière est directement liée à la surface spécifique qui est elle-même reliée à l'activité du sol.

#### **Principe de la manipulation :**

Consiste à doser une prise d'essai mise en suspension avec du bleu de méthylène. A saturation, une goutte de la suspension déposée sur du papier filtre provoque la formation d'une tâche avec une auréole.

#### **L'appareillage utilisé :**

- Un dispositif de dosage avec une baguette de verre.
- Un agitateur mécanique avec récipient cylindrique.
- Papier filtre blanc
- Tamis de maille 5mm.
- Solution de bleu de méthylène de 10g/l et Eau distillée.
- Balance et chronomètre.



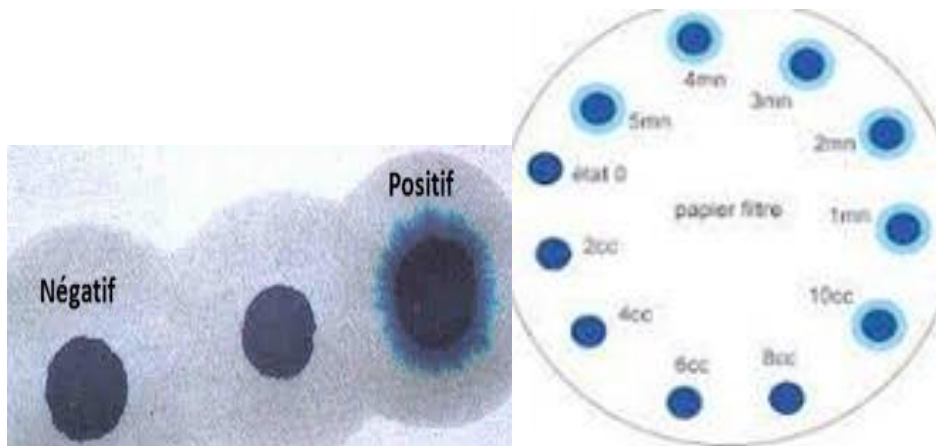
**Photo2.2 :** Appareillage de l'essai au bleu de méthylène.

#### **Mode opératoire :**

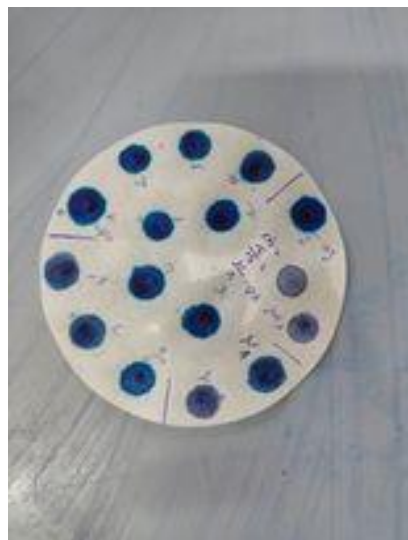
1. Prendre 10 grammes de sol sec passé au tamis 5mm.



2. Mettre la prise d'essai à tremper dans un b cher avec 100 cm d'eau.
3. A l'aide de l'agitateur (700 tr/min), dispers e la suspension pendant 5 min.
4. A l'aide du dispositif de dosage, introduire 10 cm<sup>3</sup> de bleu et agiter (400 tr/min) pendant 1 min.
5. A l'aide d'une baguette, déposer une goutte de la suspension sur du papier filtre (l'essai de la tâche).
6. La goutte centrale bleue est entour e d'une zone humide incolore : le test est négatif,
7. La goutte centrale bleue est entour e d'une zone humide teint e de bleu ; le test est positif.



**Figure 2.1** : Test d'essai au bleu de méthylène



**Photo 2.3** : Essai au bleu de méthylène

La valeur au bleu de méthylène est exprim e en (gr) de bleu pour 1Kg de la fraction 0/2 mm, avec :

**V1** : Volume total de solution inject e (ml) **50= ML**



**M1** : masse de la prise d'essai **30= g**.

$$\text{VBS} = \text{V1} * 0,01 / \text{M1} * 100 = 1.67$$

$$1,5 \leq \text{VBS} < 2.5 \text{ Sol sablo argileux, peu plastiques}$$

**Tableau2. 1** :Type de sol en fonction de la valeur de bleu de méthylène.

Valeur de bleu de méthylène (VBS)	Catégorie de sol
<b>VBS &lt; 0,1</b>	<b>Sol insensible à l'eau</b>
<b>0,2 ≤ VBS &lt; 1,5</b>	<b>Sol sablo limoneux, sensible à l'eau</b>
<b>1,5 ≤ VBS &lt; 2,5</b>	<b>Sol sablo argileux, peu plastiques</b>
<b>2,5 ≤ VBS &lt; 6</b>	<b>Sol limoneux de plasticité moyenne</b>
<b>6 ≤ VBS &lt; 8</b>	<b>Sol argileux</b>
<b>VBS &gt; 8</b>	<b>Sol très argileux</b>

## 2.1.2. Les essais Physiques :

### A. La Granulométrie :

La granulométrie est l'étude de la répartition des éléments d'une roche, d'un gravier, d'un sable selon leur taille. C'est la détermination des dimensions des particules agrégées et de leurs pourcentages respectifs avec analyse de la taille avec étude de la distribution de la taille des grains.

La granulométrie est l'étude de la distribution statistique des tailles d'une collection d'éléments d'un matériau solide fractionné ou d'un liquide multi phase. L'analyse granulométrique est l'ensemble des opérations dont le but est de déterminer la distribution granulométrique des éléments constituant un échantillon.

#### Principe de l'essai:

- L'essai consiste à fractionner au moyen d'une série de tamis un matériau en plusieurs classes granulaires de tailles décroissantes.
- Les masses des différents refus et tamisats sont rapportées à la masse initiale du matériau. Les pourcentages ainsi obtenus sont exploités sous forme graphique.

#### Matériel utilisé :

- Les dimensions de mailles et le nombre de tamis sont choisis en fonction de la nature de l'échantillon et de la précision attendue.
- Etuve.



- Série de tamis (0.08 ; 0.2 ; 0.4 ; 1.0 ; 2.0 ; 5.0).
- Balance.



**Photo 2.4 :**Série de tamis

#### Préparation de l'échantillon :

- prendre une masse de poids connu après échantillonnage  $M_s$ .
- BH Imbibition de l'échantillon pendant plusieurs heures suivant la nature du sol.
- Lavage du matériau sur la plus petite maille de la colonne.
- Sécher à l'étuve à une température de  $150^{\circ}\text{C}$ .
- Le poids de l'échantillon à analyser est choisi en fonction de la formule 200D P 600D.
- Pour notre essai, nous avons pris  $M_s = 400$  gr



**Photo2.5 :** Echantillon de sols

#### Principe de l'essai :

- Tamisage : passage du matériau par les différents tamis de la colonne.
- Peser le refus du tamis ayant la plus grande maille RI.
- Reprendre la même opération pour la suite des tamis immédiatement inférieurs.



**Les résultats :**

- Porter les différentes pesées sur la feuille d'essai.
- Calculer les différents refus de chaque tamis :

$$\text{Refus (\%)} = \frac{R_i}{M_s} * 100$$

- Calculer les différents tamisât de chaque tamis

$$\text{Tamisât (\%)} = 100 - \text{Refus}$$

**Tableau2.2 : Résultats de l'essai Granulométrie**

Diamètre de tamis	5	2	1	0.4	0.2	0.1	0.08
Refus cumulées (%)	0	15.3	63.9	125.7	142.1	180.9	200.3
Passant (%)	0	3.8	15.9	31.42	35.52	45.22	50.07
Total (%)	100	96.2	84.1	68.58	64.48	54.78	49.93

**Tableau2.3 : La norme française NF P18-560 utilisée notamment dans le domaine.**  
Typesde sol selon la taille de la particule

Min	Appellation	Max
20mm	Cailloux	200mm
2mm	Graviers	20mm
0.2mm	Sables grossiers	2mm
0.05mm	Sables fins	0.2mm
0.02mm	Limons grossiers	0.05mm
0.02mm	Limons fins	0.02mm
	Argiles	<0.002mm

**B. L'essai de granulométrie par sédimentation :**

Tamiser l'échantillon de sol par lavage (passant au tamis 0.08mm), et récupérer le tamisât, sécher l'échantillon dans une étuve jusqu' au poids constant, prendre à 80g de tamisât sec. Imbiber la prise d'essai dans une éprouvette cylindrique en verre de 2litre contenant un mélange d'eau distillée ou déminéralisée et solution à 60ml d'hexamétaphosphate de sodium (Na<sub>6</sub> (PO<sub>3</sub>)<sub>6</sub>, 10 H<sub>2</sub>O), comme le montre.





**Photo 2.6 :** Appareil Agitateur Automatique.

- Laisser imbiber pendant au moins 24 heures à température ambiante.
- Agiter vigoureusement la suspension au moyen d'un agitateur Automatique, retirer l'agitateur manuel et déclencher au même instant le chronomètre (début de l'essai).
- Plonger le thermomètre avec précaution dans la suspension immédiatement après le déclenchement du chronomètre; procéder à la prise des lectures du densimètre et de la température aux temps suivant (en minutes): (0.5 -1 -2 -5 - 10 -20 - 40 -80- 240- 1440 ).
- Calculer le pourcentage des tamis et complète la courbe granulométrique



**Photo 2.7 :** Essai de Sédimentation au l'laboratoire

**Tableau 2.4 :** Les calculs d'essai sédimentation pour sol naturel.



Temps de lecture		Lecture densimètre	Température	Correction température	Lecture corrigée	% Passant de l'échan	Diamètre équivalent
min	sec	R	T°C	Ct	RC	P%	Dmm
	30	1.025	13	-0.0015	1.024	47.43	0.062236
1	60	1.024	13	-0.0015	1.023	45.453	0.044008
2	120	1.0225	13	-0.0015	1.0215	42.489	0.031118
5	300	1.017	13	-0.001	1.0165	32.608	0.021252
10	600	1.0145	13	-0.0015	1.0135	26.679	0.015226
20	1200	1.013	13	-0.0015	1.012	23.715	0.01087
40	2400	1.0115	14	-0.00015	1.0105	20.750	0.007759
80	4800	1.0105	15	-0.0015	1.0095	18.774	0.005521
240	14400	1.007	15	-0.0015	1.006	11.857	0.003255
1440	86400	1.006	12	-0.0015	1.005	9.881	0.001337

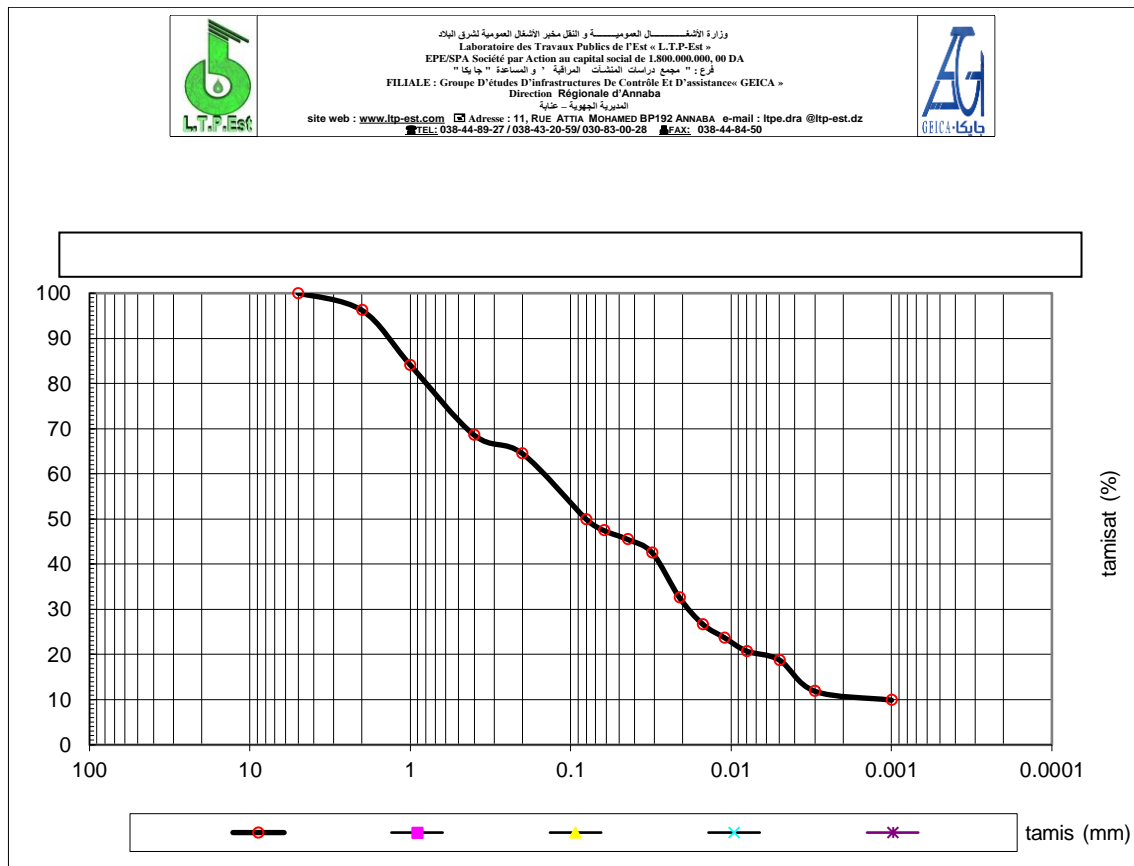


Figure 2.2 : Courbe granulométrique

### C. Essai teneur en eau (NF-P94-050) :



La teneur en eau d'un matériau est le rapport du poids d'eau contenu dans ce matériau au poids du même matériau sec. On peut aussi définir la teneur en eau  $W$  comme le poids d'eau contenu par unité de poids de matériau sec.

Les matériaux sont séchés dans l'étuve pendant 24 heures entre 105° à 115 C avant chaque utilisation. Cet essai a pour but ; la Détermination de la teneur en eau pondérale par la méthode de l'étuvage, effectuée à partir d'un échantillon de sol intact, remanié ou reconstitué. La teneur en eau est un paramètre d'état qui permet d'approcher certaines caractéristiques mécaniques et d'apprécier la consistance d'un sol fin.

**Mode opératoire :****Matériels utilisés :**

- ✓ Etuve.
- ✓ Balance.
- ✓ Tare.

**Photo 2.8 : Sol naturel****Photo 2.9 : Etuve.****Préparation de l'échantillon :**

- Préparation de l'échantillon ; c.à.d. prendre la partie de carotte que l'on doit déterminer sa teneur en eau, la couper en quelques morceaux, les mettre dans une tare.
- Peser immédiatement le matériau dans son état naturel.
- Sécher le matériau pendant (24h étuve 105°C pour sols insensibles et 48h étuve 50°C pour sols sensibles)
- Peser le matériau sec

**Tableau 2.5 :La Teneur en eau initial**

<b>Sol humide+ poids de la tarre (g)</b>	<b>400</b>
<b>Poids de la tarre (g)</b>	82.23
<b>Sol sec +poids de la tarre (g)</b>	366.6
<b>Poids de l'eau (g)</b>	115.63
<b>Teneur en eau (%)</b>	11.17



Dans cet essai la teneur en eau pour le sol naturel égale 11.17 %.

### D. Essais d'Atterberg :

#### Matériel utilisé :

- Etuve
- Appareil de Casagrande.
- Outil a rainuré
- Tares, spatule, balance électronique

#### Mode opératoire :

##### Limite de liquidité:

- Prendre environ 200 gr de sol préalablement tamisé au tamis 0.4 mm par voie humide et séché.
- Malaxer la totalité de la prise de telle sorte à obtenir une pate homogène et presque fluide.
- Prendre une partie de la pâte et l'étaler dans la coupelle de l'appareil de Casagrande à l'aide de la spatule.
- Pratiquer une rainure dans cette pate de telle sorte à la diviser en deux. L'outil a rainurer devra être tenu perpendiculairement à la coupelle en présentant sa partie biseautée face à la direction du mouvement.
- soumettre la coupelle et le matériau qu'elle contient a des chocs répétés avec une cadence de 2 coups par seconde.
- Arrêter les chocs quand les deux lèvres se rejoignent sur environ 1cm, noter le nombre de coups N correspondant.
- Prélever des deux côtés des lèvres à l'endroit où elles se sont refermées environ 5 gr de sol. Afin d'en déterminer la teneur en eau.
- Rehomogénéiser le sol et le sécher un peu puis reprendre les opérations de 3 à 7. IL faut au moins trois essais avec un nombre de coups croissant et de préférence bien étalé entre 15 et 35.





N° essai	Essai 1		Essai 2		Essai 3		Essai 4	
Nombre de coups	14		21		24		29	
N° de la tare	VM	XL	BB	AV	BT	BY	VC	MX
Masse de l'ensemble (échan humide +Tare) m2(g)	22.70	23.42	23.61	27.90	23.38	23.38	24.70	23.74
Tare m1(g)	16.16	16.86	17.09	21.32	16.83	16.79	18.15	17.17
Masse de l'échan humide m=m2 – m1 (g)	6.54	6.56	6.52	6.58	6.55	6.59	6.55	4.89
Masse de l'échan sec mw= m2-m3	4.78	4.79	4.80	4.85	4.85	4.88	4.88	4.89
Masse de l'eau(g)	1.76	1.77	1.72	1.73	1.70	1.71	1.67	1.68
Teneur en eau(%)	36.82	36.95	35.83	35.69	35.05	35.04	34.22	34.35
Moyenne(%)	36.8		35.7		35		34.3	
Wl	36							



**Photo2.10** Limite de liquidité à laboratoire (LTPE– Annaba)



### Limite de plasticité:

- Prendre un peu de matériau et former une petite boule.
  - Rouler à la main sur la plaque de marbre cette boule de telle sorte a obtenir un bâtonnet.
  - Trois cas peuvent se présenter:
    - \* Le bâtonnet confectionné commence à se fissurer quand il atteint une longueur de 15 cm et un diamètre de 3mm. Dans ce cas, le sol est à al limite de plasticité et il faut la mesurer.
    - \* Le sol est encore fluide et vous n'arrivez pas à confectionner le bâtonnet. Il faut sécher un peu le matériau.
    - \*Le bâtonnet commence à se fissurer trop tôt, le matériau est sec. Il faut l'humidifier un peu.
- Il faut réaliser au moins deux essais pour la limite de plasticité



**Photo 2.11** : limite de plasticité à laboratoire (LTPE-Annaba).

**Tableau 2.7** : limite de plasticité sol pour sol naturel

Essai limite de plasticité		
N° de la tare	HY	AD
Masse de l'ensemble (échan humide +Tare) m2	18.53	16.25
Tare m1(g)	17.03	14.79
Masse de l'échan humide m=m2 – m1 (g)	15	16.6
Masse de l'échan sec mw= m2-m3	1.20	1.15
Masse de l'eau(g)	3.0	3.1
Teneur en eau(%)	25	26.95
Moyenne(%)	25.9	
Wp	26	

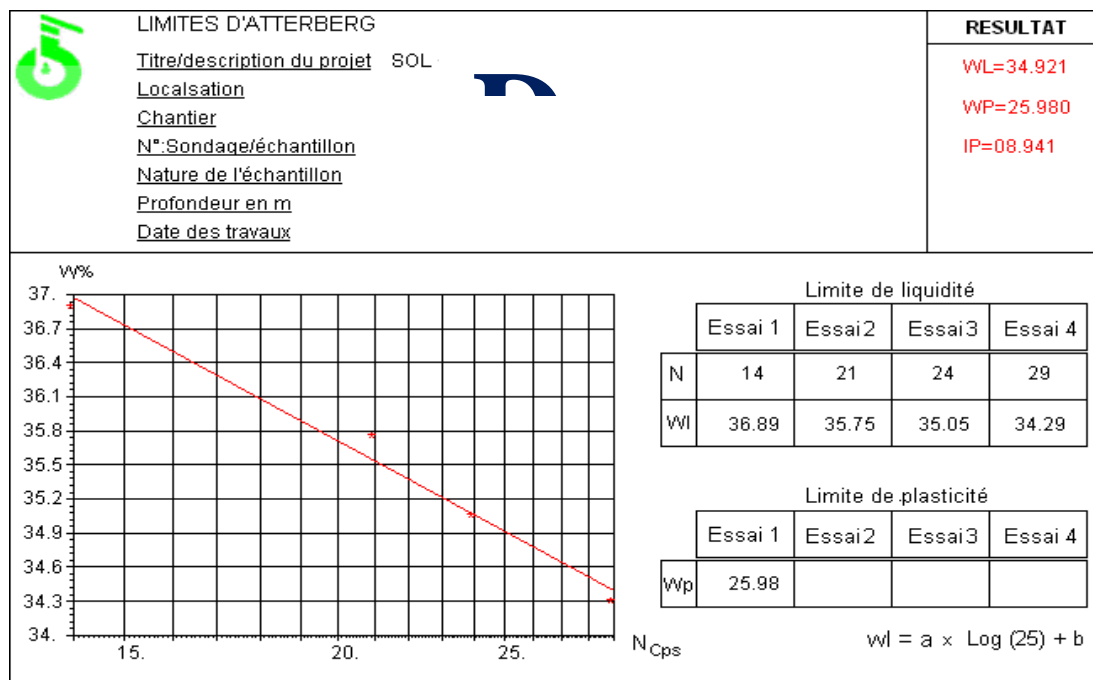
L'indice de plasticité :  $I_p = W_L - W_P = 10$



$5 < I_p < 10$  : sol reconstitué d'une classe : **Moyennement plastique**

**Tableau 2.8** : classification indice de plasticité et degré de plasticité

Indice de plasticité	Degré de plasticité
$0 < I_p < 5$	Non plastique
$5 < I_p < 15$	Moyennement plastique
$15 < I_p < 40$	Plastique
$I_p > 40$	Très plastique



**Figure 2.3** : Courbe limite d'Atterberg pour sol naturel

### 2.1.3. Essais mécanique

#### A. L'essai Proctor :

##### But de l'essai :

C'est l'un des essais les plus utilisés en géotechnique routière. Il a pour but de déterminer au laboratoire les conditions de compactage d'un sol donnée en fonction de la teneur en eau et l'énergie de compactage à une énergie de compactage donnée, il s'agit de déterminer la teneur en eau optimale ( $W_{opt}$ ) et la densité maximale ( $\gamma_d \max$ ) Proctor correspondantes.

-L'essai s'effectue sur un matériau ne contenant que des éléments inférieurs à 20mm. Il existe deux sortes d'essais Proctor : Proctor normal et Proctor modifié.

##### Mode opératoire :

- On prend 2,2 kg de sable préalablement préparé qu'on verse dans un bac.



- On ajoute une certaine quantité d'eau proportionnelle au poids du sol utilisé.
- A l'aide de la truelle on malaxe bien le sable.
- On remplit le **moule Proctor** normalisé en trois couches puis après avoir versé chaque couche on compacte l'aide de la **dame Proctor normal** en 25 coups en respectant la hauteur de chute et en assurant une répartition équitable des coups sur la surface à compacter. On procède de la même manière après la mise en
- place de la 2eme et 3eme couche.

#### Appareillage Proctor normal :

Poids de moule **1734,9 gr**

Poids de la dame **2,490 kg**

Hauteur de la chute **305 mm**

Nombre de couches **3**

Nombre de coups **25 (chaque couche)**

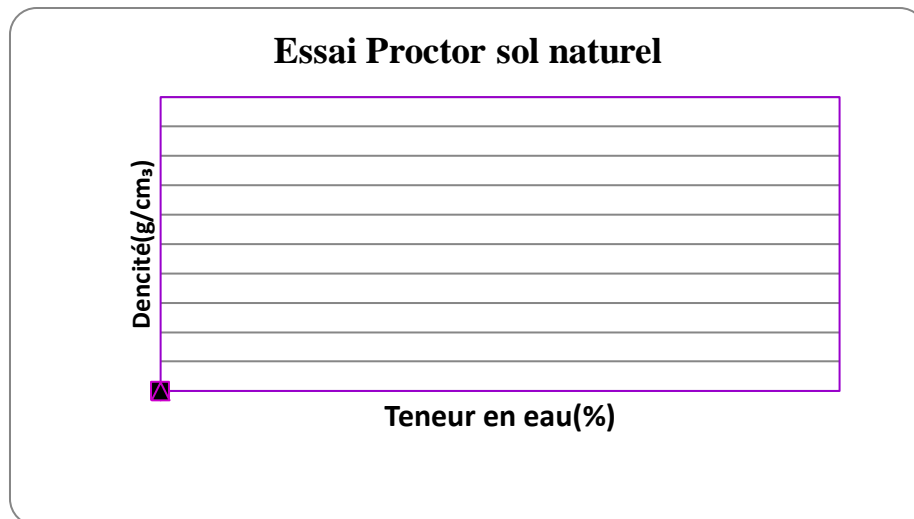


**Photo 2.12 :** l'essai Proctor pour sol sans additives dans laboratoire(LTPE. Annaba)

**Tableau 2.10 :** Les résultats des paramètres de l'essai Proctor standard pour sol naturel.

Sol naturel			
Pourcentage d'eau (%)	6	8	10
Masse volumique humide (g/cm <sup>3</sup> )	1.99	2.04	1.98





**Figure 2.4 :** Courbe de compactage (Essai Proctor normal) pour sol naturel.

## **B. L'essai de cisaillement direct non consolidé non drainé UU :(NF P94-071)**

### **But de l'essai :**

Il s'agit de déterminer les caractéristiques mécaniques d'un sol en procédant au cisaillement rectiligne d'un échantillon sous charge constante.

L'essai de cisaillement permet de tracer la courbe intrinsèque du sol étudié, et de déterminer son angle de frottement interne  $\phi$  et sa cohésion  $C$ .

### **Mise en place de l'échantillon dans la boîte**

L'échantillon de sol à étudier est placé entre deux demi-boîtes qui peuvent se déplacer horizontalement l'une par rapport à l'autre.

Un piston permet d'exercer sur le sol une contrainte normale  $\sigma$  déterminée.

### **Trousse coupante :**

Poids : 46.8 g

Volume : 56.52 cm<sup>2</sup>

Hauteur : 2 cm

Diamètre : 6 cm

Vitesse de cisaillement : 1.2 mm/ms

Coef dynamométrique : 0.12

Contrainte normale ( $\sigma_1$  ;  $\sigma_2$  ;  $\sigma_3$ ) : en bar





**Photo2.13 :** Appareille cisaillement.



**Photo2.14 :** L'échantillon d'essai cisaillement laboratoire LTP-Est.



Tableau2.11 : Essai de cisaillement pour sol naturel.

Caractéristique de l'éprouvette	Expression de résultat		
Contrainte : $\sigma (Kg/cm^3)$	1	2	3
Poids humide + trousse (g)	168.5	169.0	170.8
Poids de trousse (g)	46.5	46.5	46.5
Poids de l'éprouvette (g)	122	122.5	124.3
Volume de l'éprouvette ( $cm^3$ )	55.67	55.67	55.67
N° de tare	A	A	A
Poids humide + tare (g)	250	250	250
Poids sèche + tare (g)	234.1	234.1	234.1
Poids de tare	41.6	41.6	41.6
Teneur en eau en eau initial $W_i(\%)$	3.42	3.42	3.42
Teneur en eau de saturation (%)	10.39	10.16	9.51
Teneur en eau moyenne (%)	3.42	3.42	3.42
Degré de saturation $S_r(\%)$	33	34	36
Masse volumique humide $\bar{a}_h(g/cm^3)$	2.19	2.20	2.23
Masse volumique sèche $\bar{a}_d(g/cm^3)$	2.11	2.12	2.15

Le premier tableau :

Contrainte normale (bars)	1	2	3
Contrainte cisaillement (bars)	1.294	1.753	2.471
Angle de frottement $\phi(^{\circ})$	30		
Cohésion c (bar)	0.662		

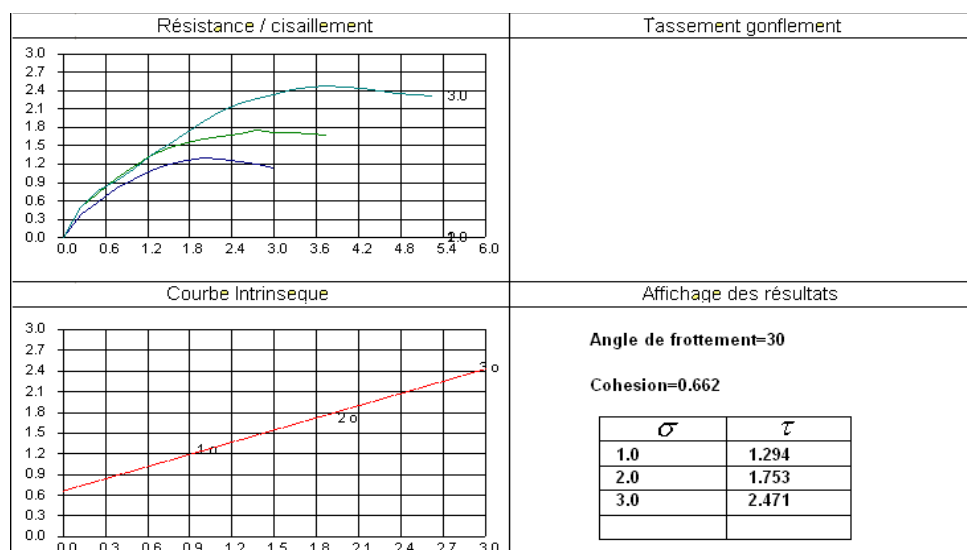


Figure2.5 : Courbe de 1 essai de cisaillement pour sol naturel



Le deuxième tableau :

Contrainte normale (bars)	1	2	3
Contrainte cisaillement (bars)	1.294	1.753	2.471
Angle de frottement $\phi$ (°)	35		
Cohésion C (bar)	0.317		

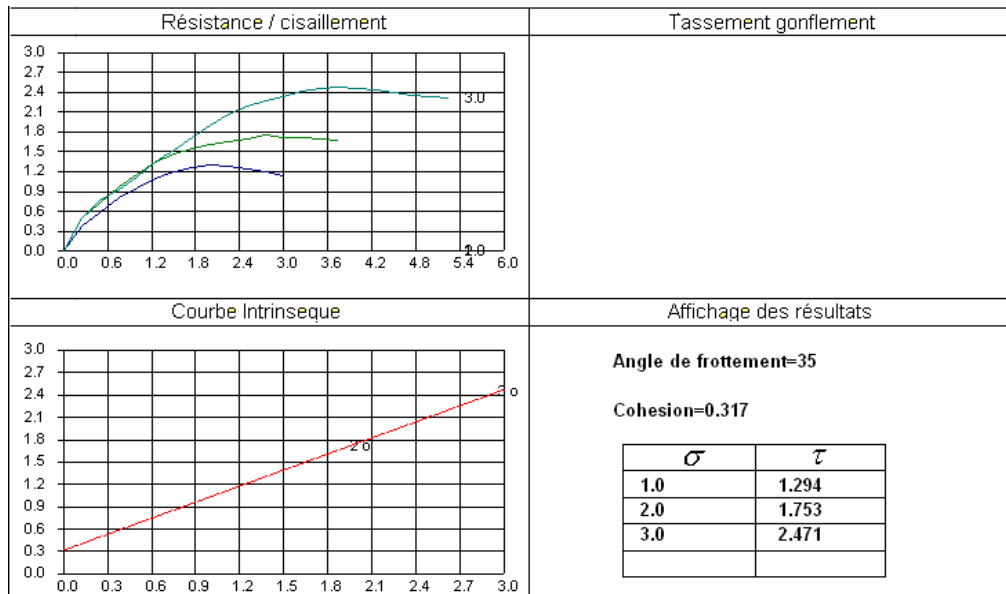
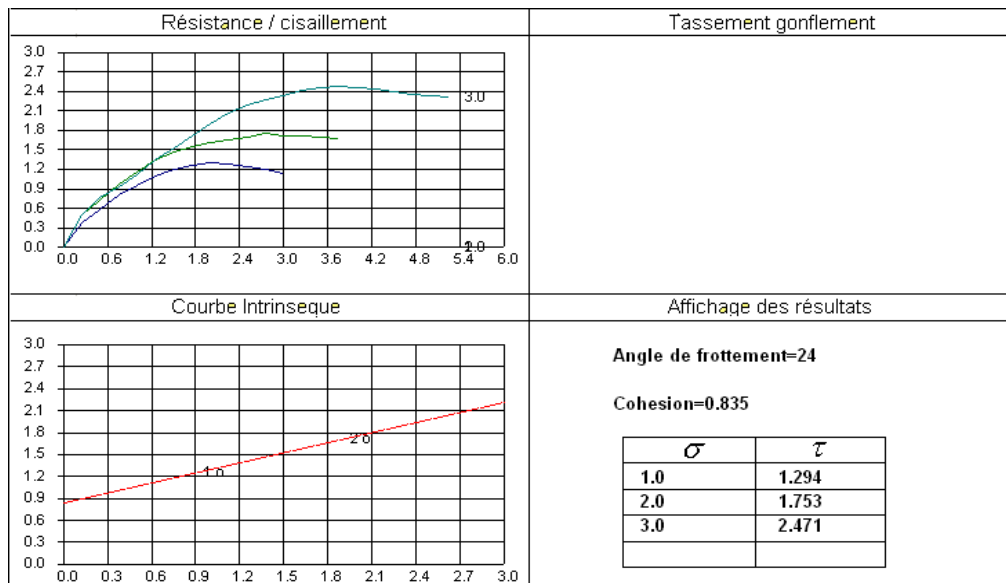


Figure2.6: Courbe de 2 essai de cisaillement pour sol naturel

Le troisième tableau :

Contrainte normale (bars)	1	2	3
Contrainte cisaillement (bars)	1.294	1.753	2.471
Angle de frottement $\phi$ (°)	24		
Cohésion C (bar)	0.835		





**Figure2.7:** Courbe de 2 essai de cisaillement pour sol naturel

**Les résultats moyens :**

Contrainte normale (bars)	1	2	3
Contrainte cisaillement (bars)	1.294	1.753	2.471
Angle de frottement moyen $\phi$ (°)	29.6		
Cohésion moyen C (bar)	0.604		

D'après l'essai de cisaillement pour **sol naturel** nous avons trouvé que l'angle de frottement égale **29.6°** et la cohésion égale **0.604bars**.

### C. Essai de CBR :(California Bearing Ratiotest) Norme NF P 94-07 :

**But de l'essai :**

L'essai permet de déterminer la capacité de portance d'un sol compacté, en estimant sa résistance au poinçonnement, en fonction de son état, sa densité et son humidité, ainsi que les charges appliquées.





Photo 2.15 : Moule CBR

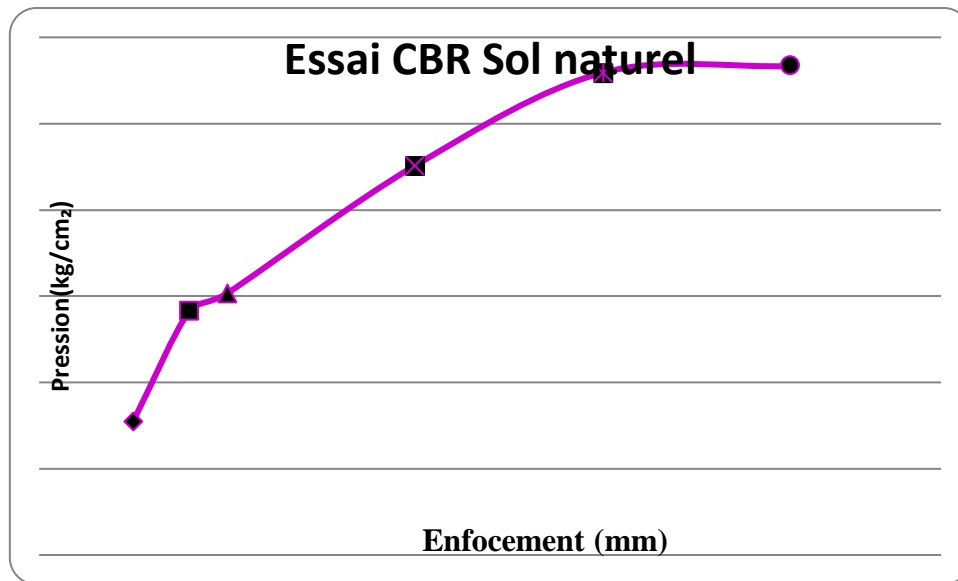


Photo 2.16 : Essais CBR Sol naturel.

Tableau 2.12 : Les résultats de l'essai de CBR Sol naturel.

Temps (min)	Enfoncement (mm)	Force totale		Pression(kg/cm <sup>2</sup> )	Calcul de l'indice portant	
		Lecture	Valeur			
1	1,25	3,003	300,3	15,49	I.P. à 2.5 = 100. F	44,04
1.5	2	5,49	549	28,31	2.5/13,35	
2	2,5	5,88	588	30,32	I.P. à 5.0 = 100. F	43,90
4	5	8,75	875	45,13	5.0/19.93	
6	7,5	10,84	1084	55,91	L'indice Portant	43,9
8	10	10,99	1099	56,68	Immédiat / CBR	





**Figure 2.8 :** Essais CBR sur un sol naturel.

D'après l'essai CBR sur sol naturel l'indice Portant Immédiat = 43.9.

### 3. Conclusion :

A partir de ces essais expérimentaux que nous avons réalisées en laboratoire sur le sol naturel pour en connaître les propriétés physiques et mécaniques dans le but de l'améliorer et de le renforcer en ajoutant la poudre de marbre, à savoir (la chaux et déchet de marbre) ;

Et les résultats obtenus de ces essais :

- Bleu méthylène : VBS = **1.67 sol sablo argileux, peu plastique.**
- Type de sol suite au l'essai granulométrique Limons sableux.
- Leur teneur en eau **11.17 %.**
- Indice de plasticités = **10 Moyennement plastique.**
- Proctor donne une masse volumique séché **2.04** à **8%** eau
- Cisaillement direct non consolidé non drainé donne un angle de frottement **29.6°** et une cohésion de **0.604 bars.**

-Essai CBR l'indice Portant Immédiat = **43.9.**



A decorative border resembling a scroll, with a vertical strip on the left and a horizontal strip at the top, both ending in small circular loops.

# Chapitre3

## Résultats et discussions



## **1. Introduction**

Ce chapitre est consacré à l'ensemble des résultats obtenus ainsi qu'aux discussions qui en résultent d'après les essais mécanique effectués sur un sol additive ;

- Essais mécaniques (Proctor, cisaillement et CBR) sol+ marbre.

## **2. Le Marbre**

En géologie, le marbre est une roche métamorphique dérivée du calcaire et constituée principalement de cristaux de calcite. La poudre de marbre est une charge carbonatée obtenue à partir d'une calcite pyrénéenne d'une grande pureté chimique. Elle est broyée et sélectionnée par voie sèche.

### **A. Propriétés**

- Produit 100% naturel.
- Extrêmement fin, il ne laisse pas de grain dans les mélanges.
- Parfaitement blanc.

### **B. Normes**

Normes algériennes : inexistantes à l'heure actuelle Les normes algériennes n'étant pas encore promulguées, les produits marbriers algériens sont extraits et transformés conformément aux normes européennes : italiennes et françaises en particulier.

Pour ce faire, les procédés utilisés en Algérie pour le travail du marbre sont ceux utilisés dans le monde En amont c'est la forassions et sciage des masses au fil hélicoïdal, au fil diamanté et à la haveuse pour l'abattage et le tranchage des masses brutes de marbres naturels en carrières. Et en aval c'est la transformation en produits finis : sciage des blocs au moyen de lames et disques à pastilles diamantées, débitage secondaire aux disques diamantés, ponçage-lustrage avec des pierres à poncer et lustrer.



### 3. Les essais effectués sur le sol + Marbre

#### 3.1. Essais de Proctor :



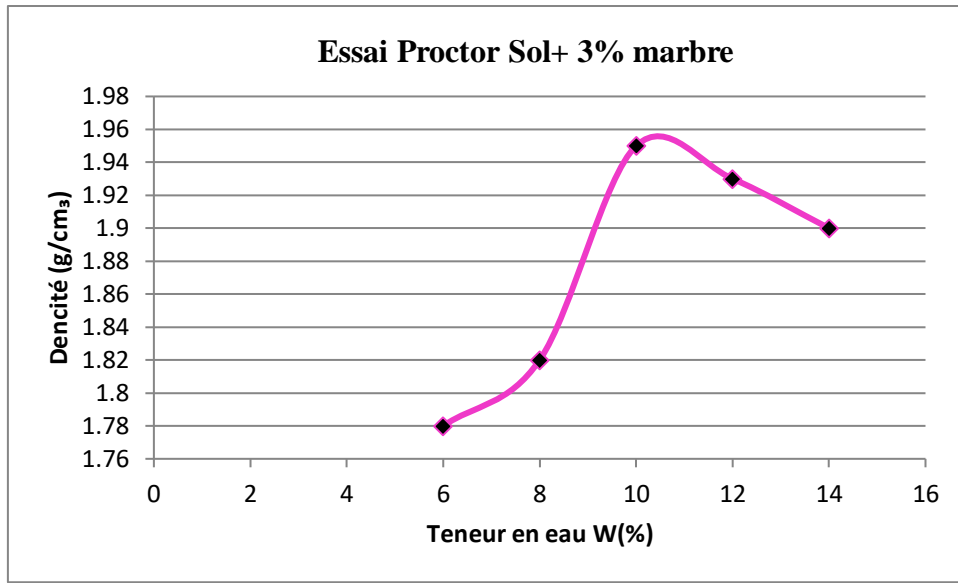
**Figure 3.1 :** L'essai Proctor pour sol avec marbre \_laboratoire(LTPE. Annaba).

**Tableau 3.1:** Les résultats de l'essai Proctor pour sol (avec 3% marbre).

Sol +3% marbre					
Pourcentage d'eau %	6	8	10	12	14
Masse volumique humide (g/cm <sup>3</sup> )	1.78	1.82	1.95	1.93	1.90

D'après l'essai Proctor pour le sol +3% marbre nous avons déduit que la masse volumique humide est 1.95 g/cm<sup>3</sup> correspondant à une teneur en eau de 10%.



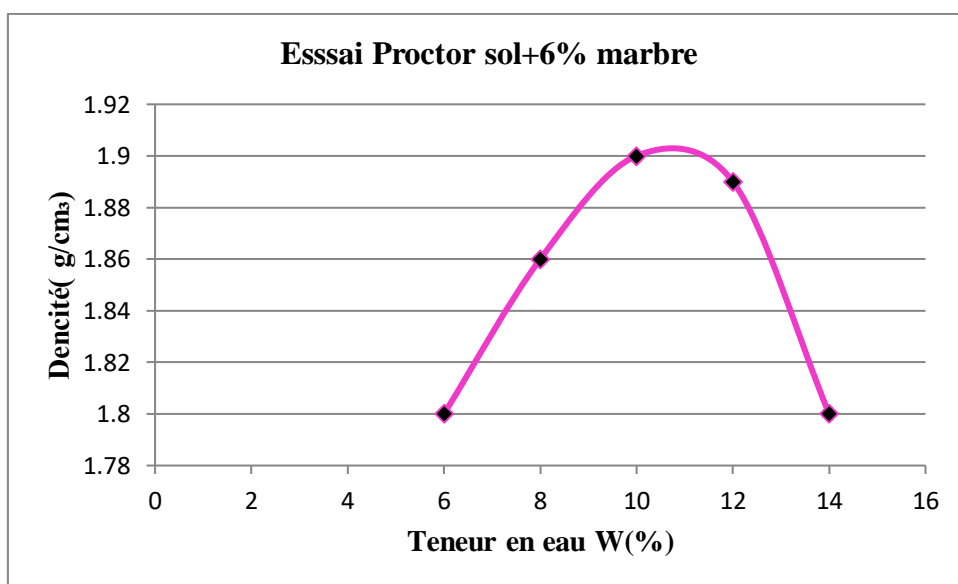


**Figure 3.2.:** Courbe de compactage (Essai Proctor normal) pour sol +3% marbre

**Tableau 3.2:** Les résultats de l'essai Proctor pour sol (avec 6% marbre).

Sol +6% marbre					
Pourcentage d'eau %	6	8	10	12	14
Masse volumique humide (g/cm <sub>3</sub> )	1.80	1.86	1.90	1.89	1.80

D'après l'essai Proctor pour le sol +6% marbre nous avons déduit que la masse volumique humide est 1.90 g/cm<sup>3</sup> correspondant à une teneur en eau de 10%.



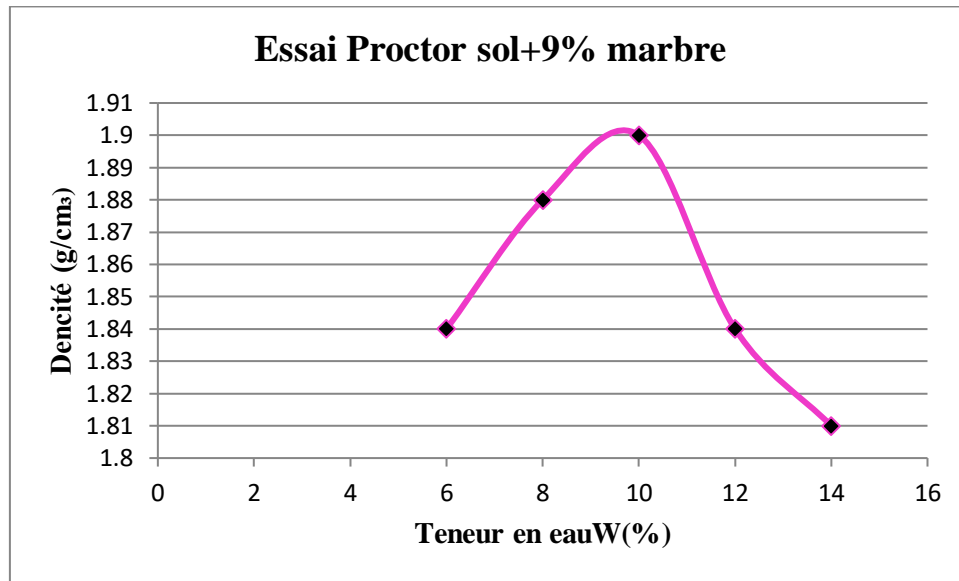
**Figure 3.3 :** Courbe de compactage (Essai Proctor normal) pour sol +6% marbre



**Tableau 3.3:** Les résultats de l'essai Proctor pour sol (avec 9% marbre).

Sol +9% marbre					
Pourcentage d'eau %	6	8	10	12	14
Masse volumique humide (g/cm <sup>3</sup> )	1.84	1.88	1.90	1.84	1.81

D'après l'essai Proctor pour le sol +9% marbre nous avons déduit que la masse volumique humide est 1.90 g/cm<sup>3</sup> correspondant à une teneur en eau de 10%.



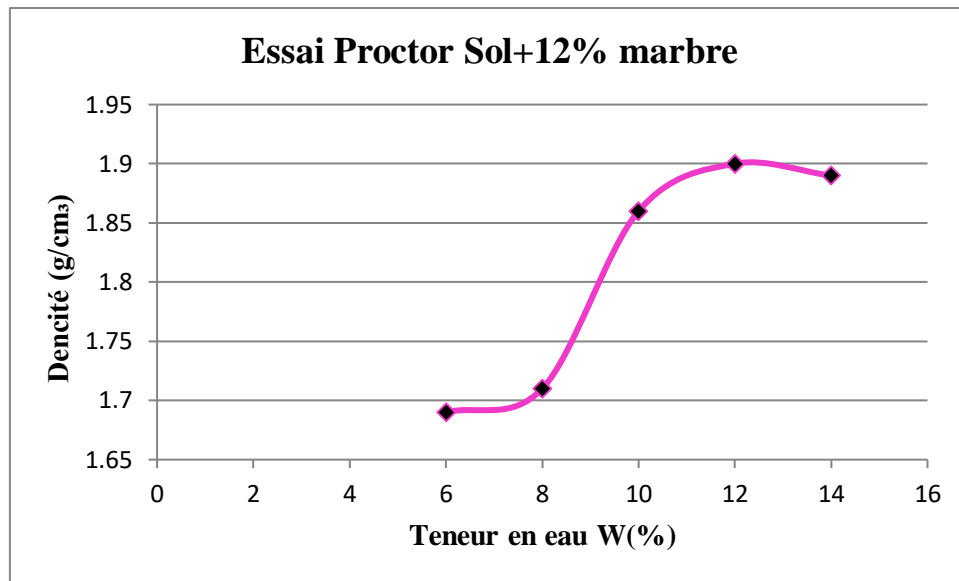
**Figure 3.4 :** Courbe de compactage (Essai Proctor normal) pour sol +9% marbre

**Tableau 2.4 :** Les résultats de l'essai Proctor pour sol (avec 12% marbre).

Sol +12% marbre					
Pourcentage d'eau %	6	8	10	12	14
Masse volumique humide (g/cm <sup>3</sup> )	1.69	1.71	1.86	1.90	1.89

D'après l'essai Proctor pour le sol +12% marbre nous avons déduit que la masse volumique humide est 1.90 g/cm<sup>3</sup> correspondant à une teneur en eau de 12%.





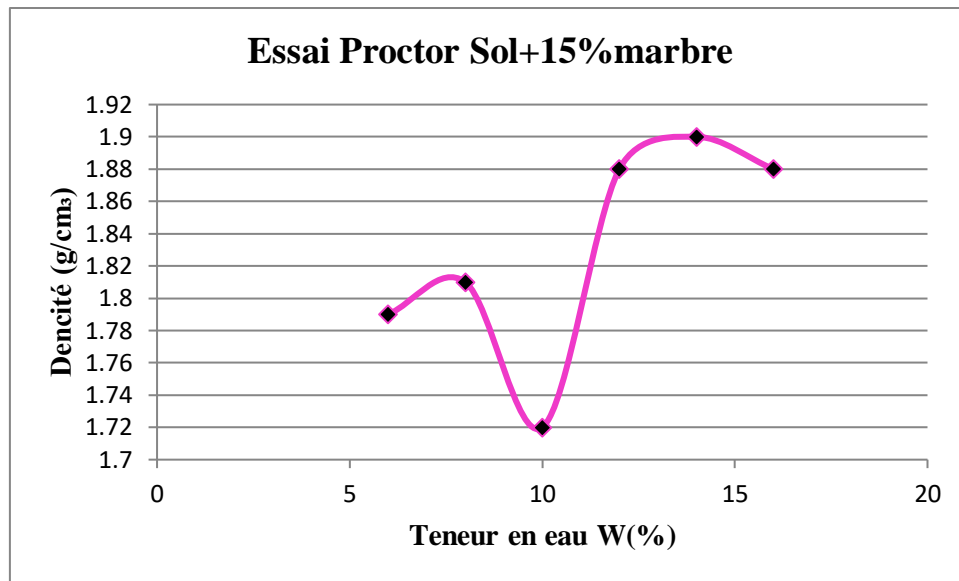
**Figure 3.5:** Courbe de compactage (Essai Proctor normal) pour sol +12% marbre

**Tableau 3.5 :** Les résultats de l'essai Proctor pour sol (avec15% marbre).

Sol +15% marbre						
Pourcentage d'eau %	6	8	10	12	14	16
Masse volumique humide (g/cm³)	1.79	1.81	1.72	1.88	1.90	1.88

D'après l'essai Proctor pour le sol +15% marbre nous avons déduit que la masse volumique humide est 1.90 g/cm³ correspondant à une teneur en eau de 14%.

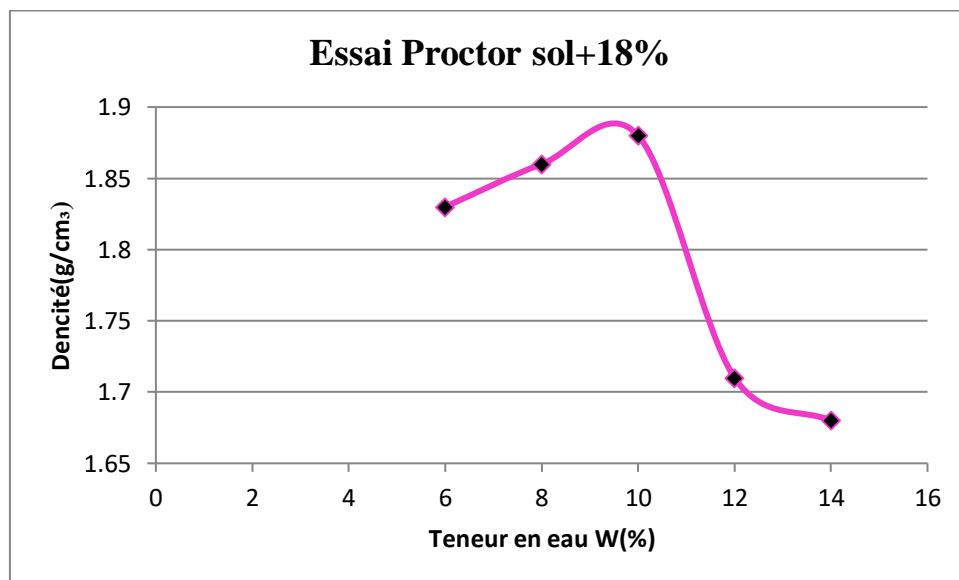




**Figure3.6:** Courbe de compactage (Essai Proctor normal) pour sol +15% marbre

**Tableau 3.6 :** Les résultats de l'essai Proctor pour sol (avec18% marbre).

Sol +18% marbre					
Pourcentage d'eau %	6	8	10	12	14
Masse volumique humide (g/cm <sup>3</sup> )	1.83	1.86	1.88	1.71	1.68



**Figure3.7:** Courbe de compactage (Essai Proctor normal) pour sol +18% marbre



### 3.2 Essai de cisaillement :

Tableau3.7 : Essai de cisaillement Sol +3% Marbre

Contrainte $\delta$ (kg/cm <sup>2</sup> )	1	2	3
Masse humide+ trousse(g)	156.1	156.8	157.2
Masse de la trousse (g)	46.5	46.5	46.5
Masse nette de l'éprouvette (g)	109.6	110.3	110.7
Volume de l'éprouvette (g)	55.67	55.67	55.67
N° de la tare	MS	MS	MS
Masse totale humide + tare(g)	250	250	250
Masse totale sèche + tare(g)	238.4	238.4	238.4
Masse de la tare(g)	40.9	40.9	40.9
Teneur en eau initial wi (%)	5.9	5.9	5.9
Teneur en eau de saturation(%)	17.05	16.47	16.47
Teneur en eau moyenne(%)	5.9	5.9	5.9
Degré de saturation Sr(%)	34	35	35
Masse volumique humide $\gamma_h$ (g/cm <sup>3</sup> )	1.96	1.98	1.98
Masse volumique sèche $\gamma_d$ (g/cm <sup>3</sup> )			

Tableau1 : Le premier essai de cisaillement Sol +3% Marbre

Contrainte normale (bars)	1	2	3
Contrainte de cisaillement( bars)	1.225	1.967	3.332
Angle de frottement $\phi$ (°)	36		
Cohésion C(bars)	0.483		

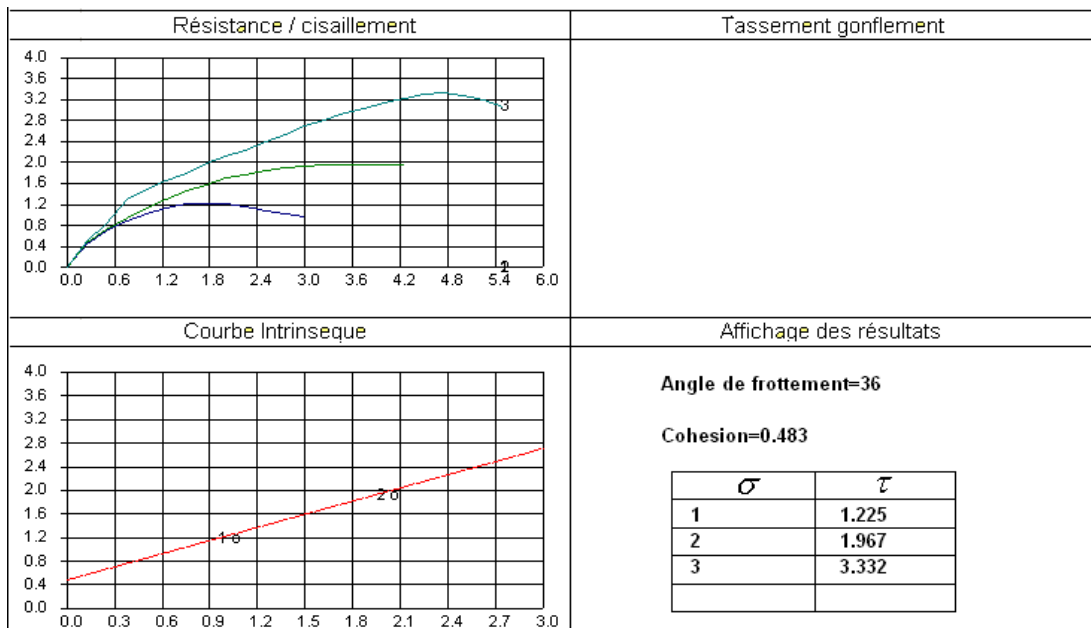
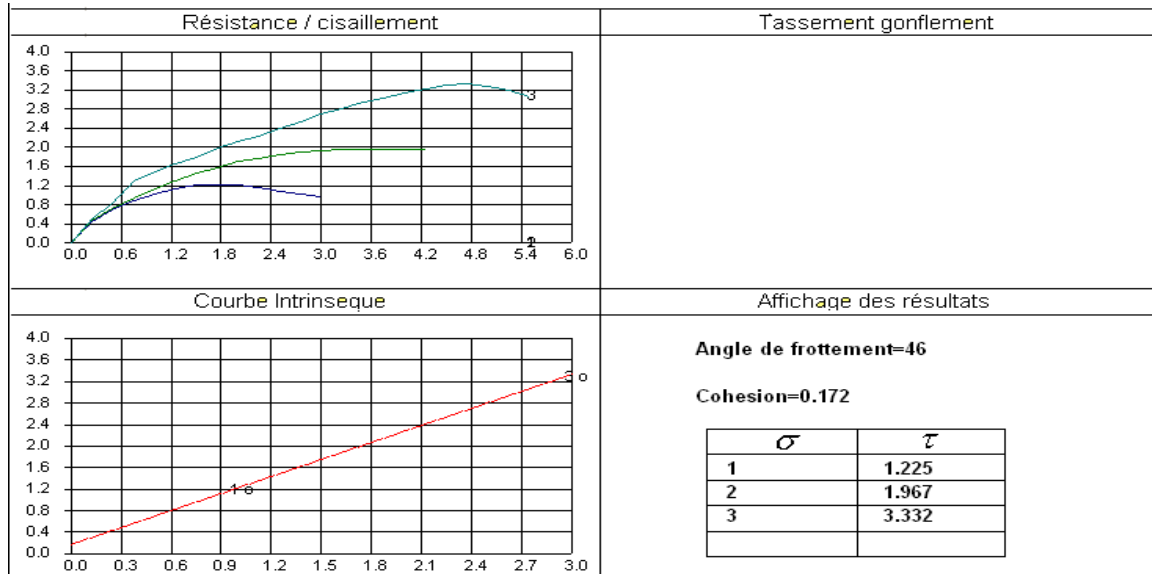


Figure1 : Courbe de premier essai de cisaillement Sol +3% Marbre



**Tableau2** : Le deuxième essai de cisaillement Sol +3% Marbre

Contrainte normale (bars)	1	2	3
Contrainte de cisaillement( bars)	1.225	1.967	3.332
Angle de frottement $\phi$ (°)	46		
Cohésion C(bars)	0.172		

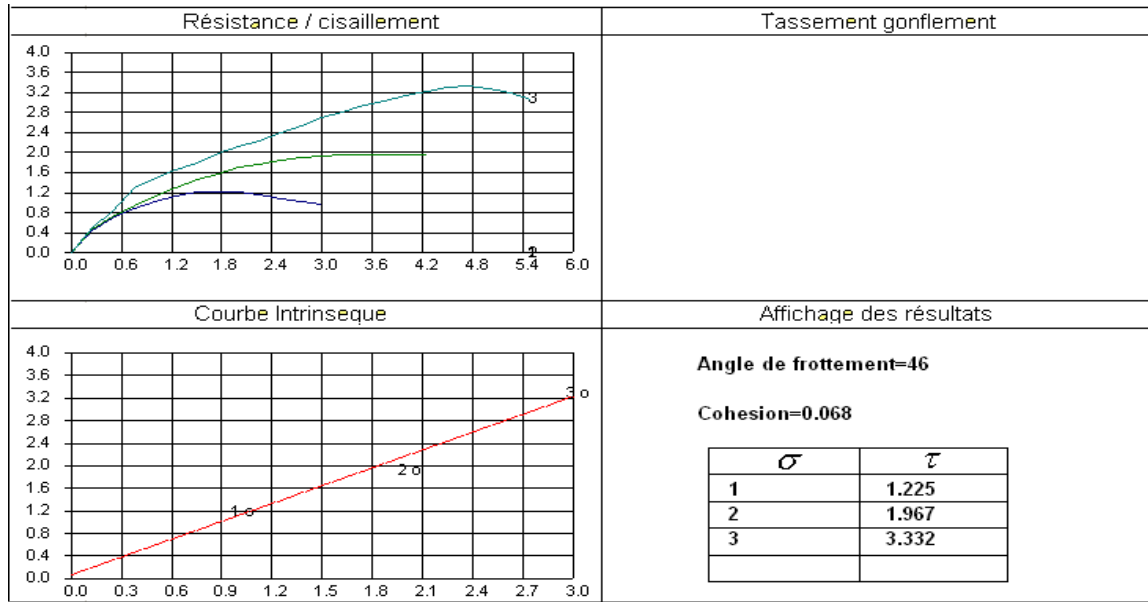


**Figure2** :Courbe de deuxième essai de cisaillement Sol +3% Marbre

**Tableau 3** :Le troisième essai de cisaillement Sol +3% Marbre

Contrainte normale (bars)	1	2	3
Contrainte de cisaillement( bars)	1.225	1.967	3.332
Angle de frottement $\phi$ (°)	46		
Cohésion C(bars)	0.068		





**Figure3** :courbe detroisième essai de ciailement Sol +3% Marbre

D'après l'essai de cisaillement pour **sol+3%** marbre nous avons trouvé que l'angle de frottement égale **43°** et la cohésion égale **0.241 bars**.

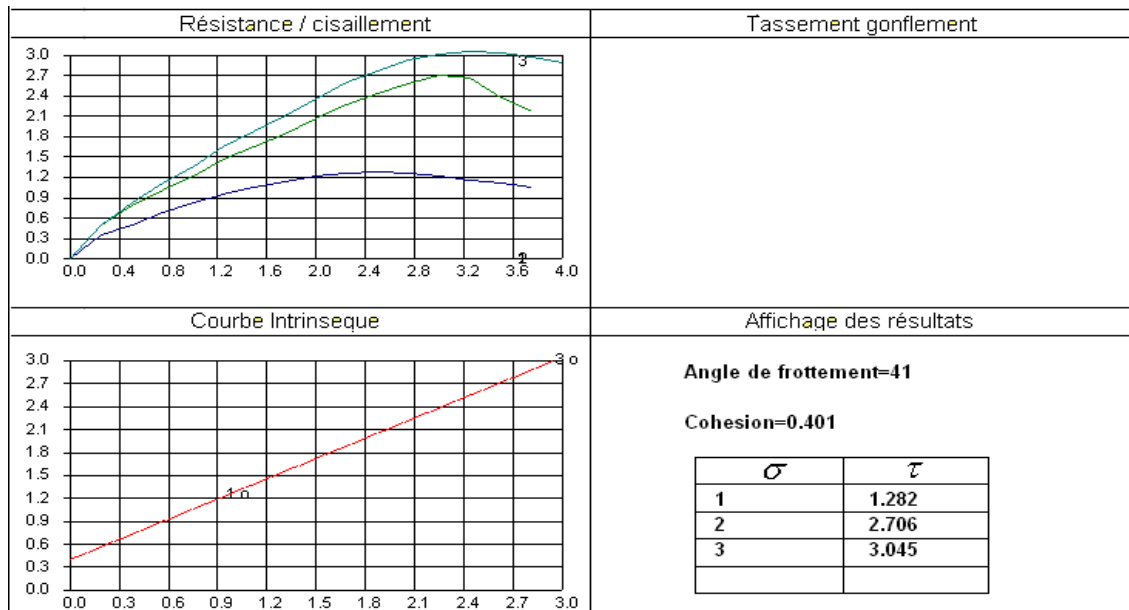
**Tableau3.8** : Essai de ciailement Sol +6% Marbre

Contrainte $\delta$ (kg/cm <sub>2</sub> )	1	2	3
Masse humide+ trousse(g)	159.1	159.9	160.7
Masse de la trousse (g)	46.5	46.5	46.5
Masse nette de l'éprouvette (g)	112.6	113.4	114.2
Volume de l'éprouvette (g)	55.67	55.67	55.67
N° de la tare	B	B	B
Masse totale humide + tare(g)	250	250	250
Masse totale sèche + tare(g)	234.3	234.3	234.3
Masse de la tare(g)	43.9	43.9	43.9
Teneur en eau initial wi (%)	8.2	8.2	8.2
Teneur en eau de saturation(%)	16.2	15.9	15.9
Teneur en eau moyenne(%)	8.2	8.2	8.2
Degré de saturation Sr(%)	51	52	52
Masse volumique humide $\gamma_h$ (g/cm <sub>3</sub> )	2.03	2.04	2.05
Masse volumique sèche $\gamma_d$ (g/cm <sub>3</sub> )	1.88	1.89	1.89

**Tableau 1** :Le premier essai de ciailement Sol +6% Marbre

Contrainte normale (bars)	1	2	3
Contrainte de cisaillement( bars)	1.282	2.706	3.045
Angle de frottement $\phi$ (°)	41		
Cohésion C(bars)	0.401		

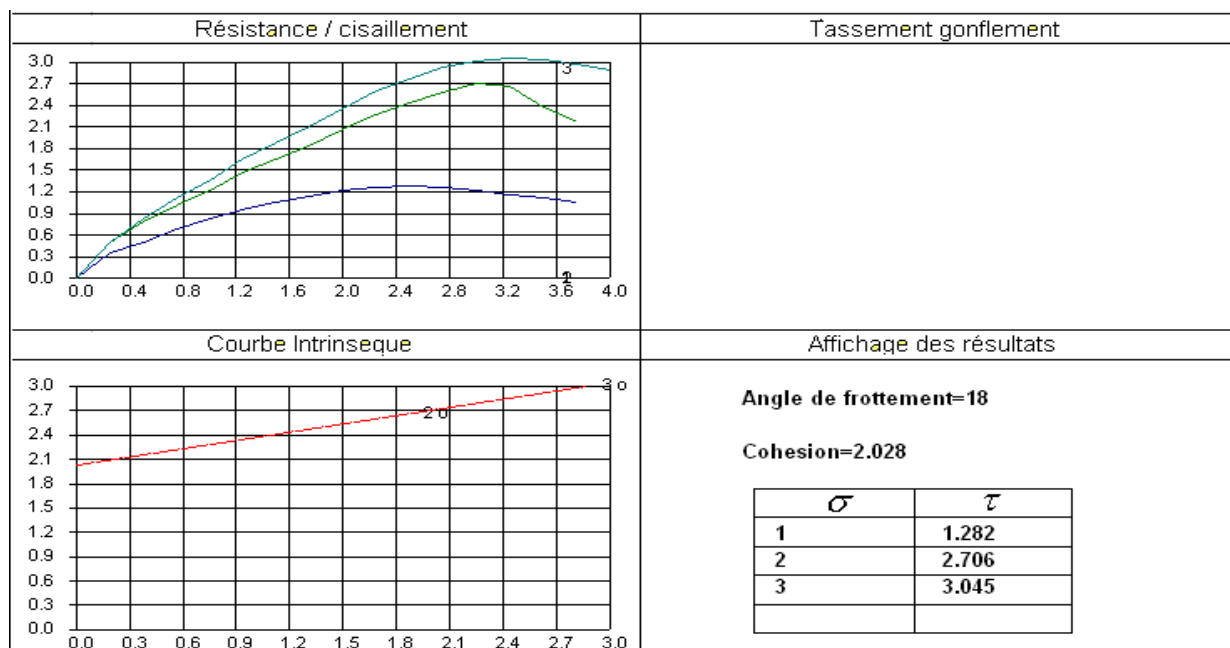




**Figure1** : Courbe de premier essai de cisaillement Sol +6% Marbre

**Tableau2** : Le deuxième essai de cisaillement Sol +6% Marbre

Contrainte normale (bars)	1	2	3
Contrainte de cisaillement( bars)	1.282	2.706	3.045
Angle de frottement $\phi(^{\circ})$	18		
Cohésion C(bars)	2.028		

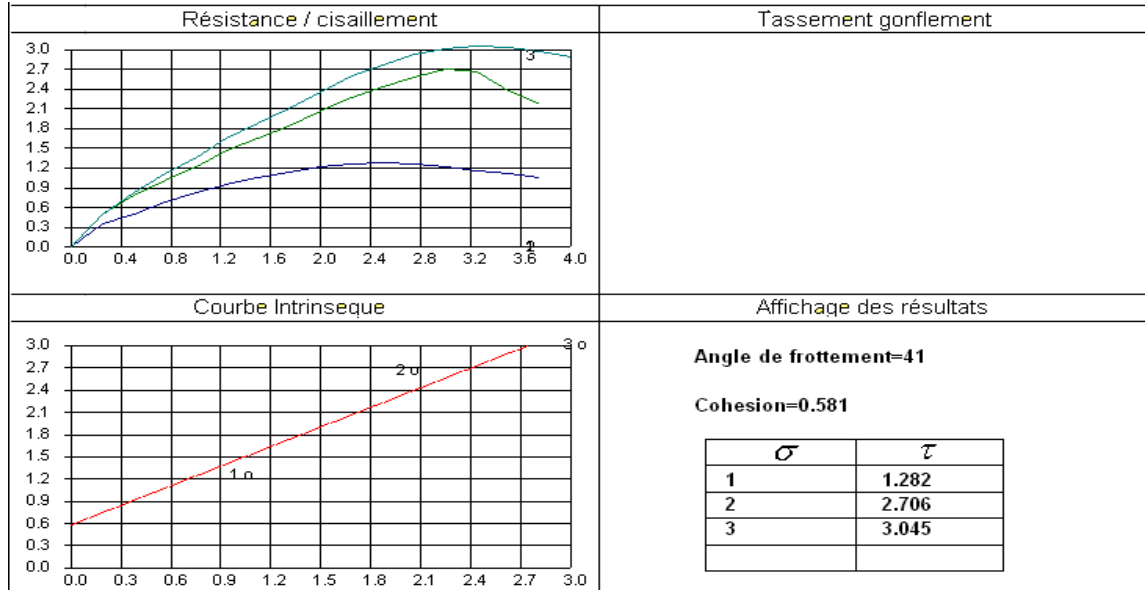


**Figure2** : Courbe de deuxième essai de cisaillement Sol +6% Marbre



**Tableau 3 :**Le troisième essai de cisaillement Sol +6% Marbre

Contrainte normale (bars)	1	2	3
Contrainte de cisaillement( bars)	1.282	2.706	3.045
Angle de frottement $\phi(^{\circ})$	41		
Cohésion C(bars)	0.581		



**Figure3 :** Courbe de troisième essai de cisaillement Sol +6% Marbre

D'après l'essai de cisaillement pour **sol+6%** marbre nous avons trouvé que l'angle de frottement égale **33°** et la cohésion égale **1.003bars**.



Tableau 3.9: Essai de cisaillement Sol +9% Marbre

Contrainte $\delta$ (kg/cm <sup>2</sup> )	1	2	3
Masse humide+ trousse(g)	161.1	161.7	162.0
Masse de la trousse (g)	46.5	46.5	46.5
Masse nette de l'éprouvette (g)	114.6	115.2	115.5
Volume de l'éprouvette (g)	55.67	55.67	55.67
N° de la tare	CS	CS	CS
Masse totale humide + tare(g)	250	250	250
Masse totale sèche + tare(g)	234.4	234.4	234.4
Masse de la tare(g)	43.1	43.1	43.1
Teneur en eau initial $w_i$ (%)	8.2	8.2	8.2
Teneur en eau de saturation(%)	15.6	15.4	15.4
Teneur en eau moyenne(%)	8.2	8.2	8.2
Degré de saturation $S_r$ (%)	52	53	53
Masse volumique humide $\gamma_h$ (g/cm <sup>3</sup> )	2.06	2.07	2.07
Masse volumique sèche $\gamma_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	1.90	1.91	1.91

Tableau 1 :Le premier essai de cisaillement Sol +9% Marbre

Contrainte normale (bars)	1	2	3
Contrainte de cisaillement( bars)	1.373	2.232	3.122
Angle de frottement $\phi$ (°)	40		
Cohésion C(bars)	0.514		

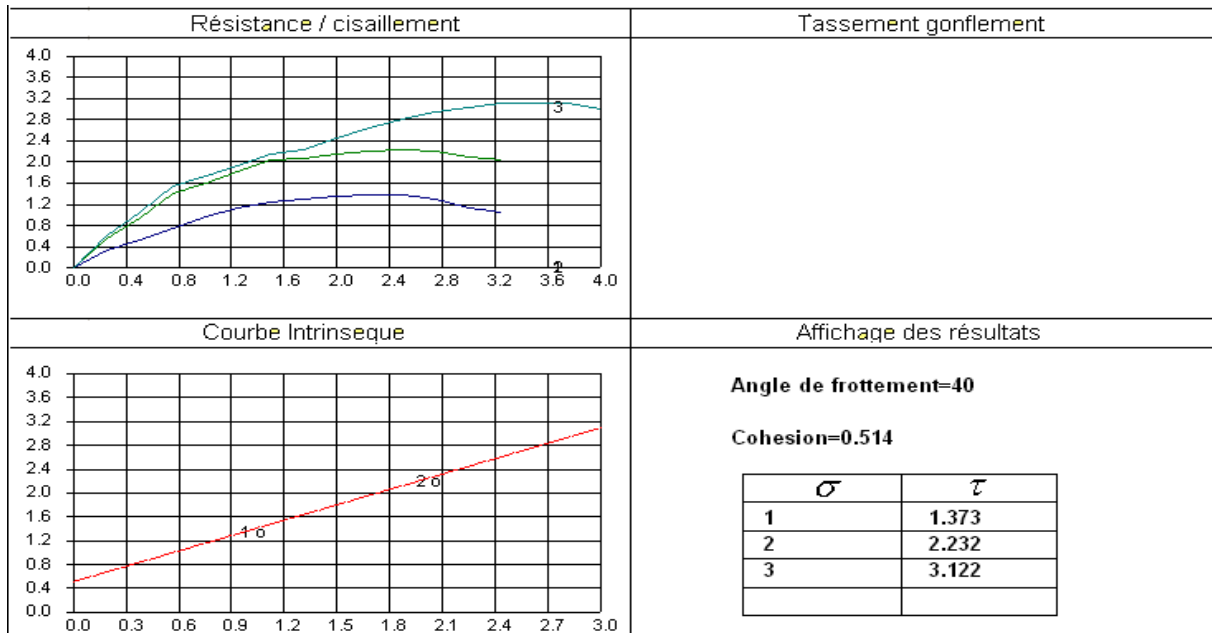
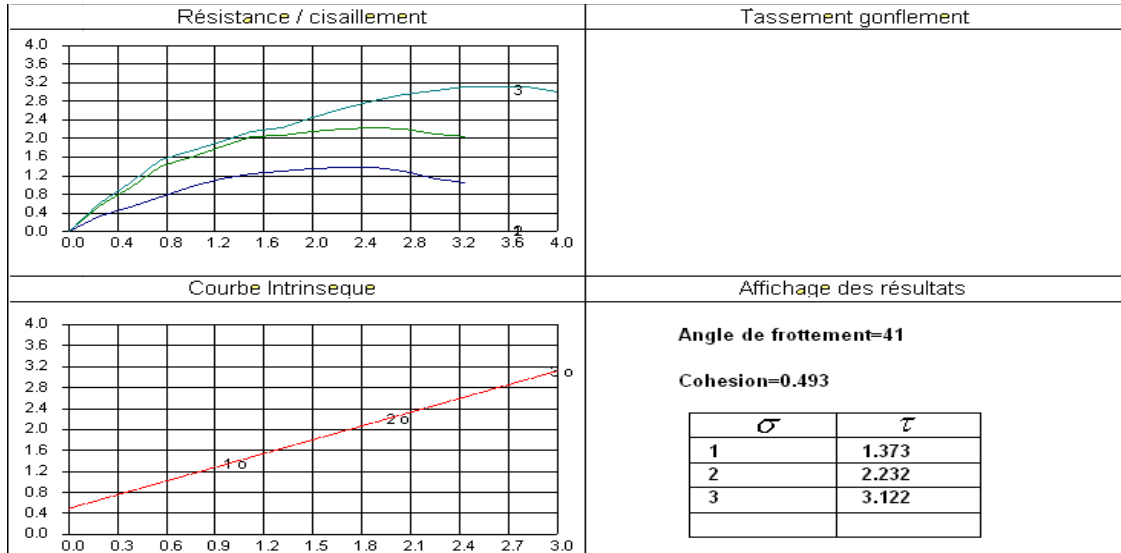


Figure1 :Courbe de premier essai de cisaillement Sol +9% Marbre



**Tableau2 :**Le deuxième essai de cisaillement Sol +9% Marbre

<b>Contrainte normale (bars)</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
<b>Contrainte de cisaillement( bars)</b>	1.373	2.232	3.122
<b>Angle de frottement<math>\phi</math>(°)</b>	40		
<b>Cohésion C(bars)</b>	0.514		

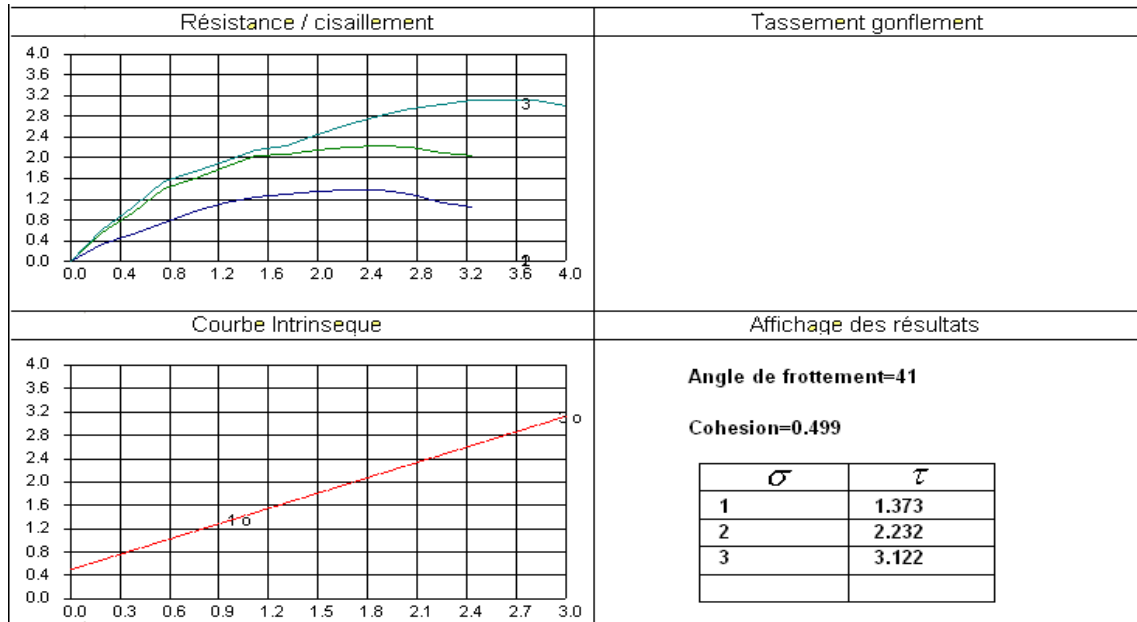


**Figure2 :**Courbe dedeuxièmeessai de cisaillement Sol +9% Marbre

**Tableau3 :**Letroisième essai de cisaillement Sol +9% Marbre

<b>Contrainte normale (bars)</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
<b>Contrainte de cisaillement( bars)</b>	1.373	2.232	3.122
<b>Angle de frottement<math>\phi</math>(°)</b>	41		
<b>Cohésion C(bars)</b>	0.499		





**Figure3 :** Courbe de troisième essai de cisaillement Sol +9% Marbre

D'après l'essai de cisaillement pour sol+9% marbre nous avons trouvé que l'angle de frottement égale  $40.5^\circ$  et la cohésion égale **0.495 bars**.

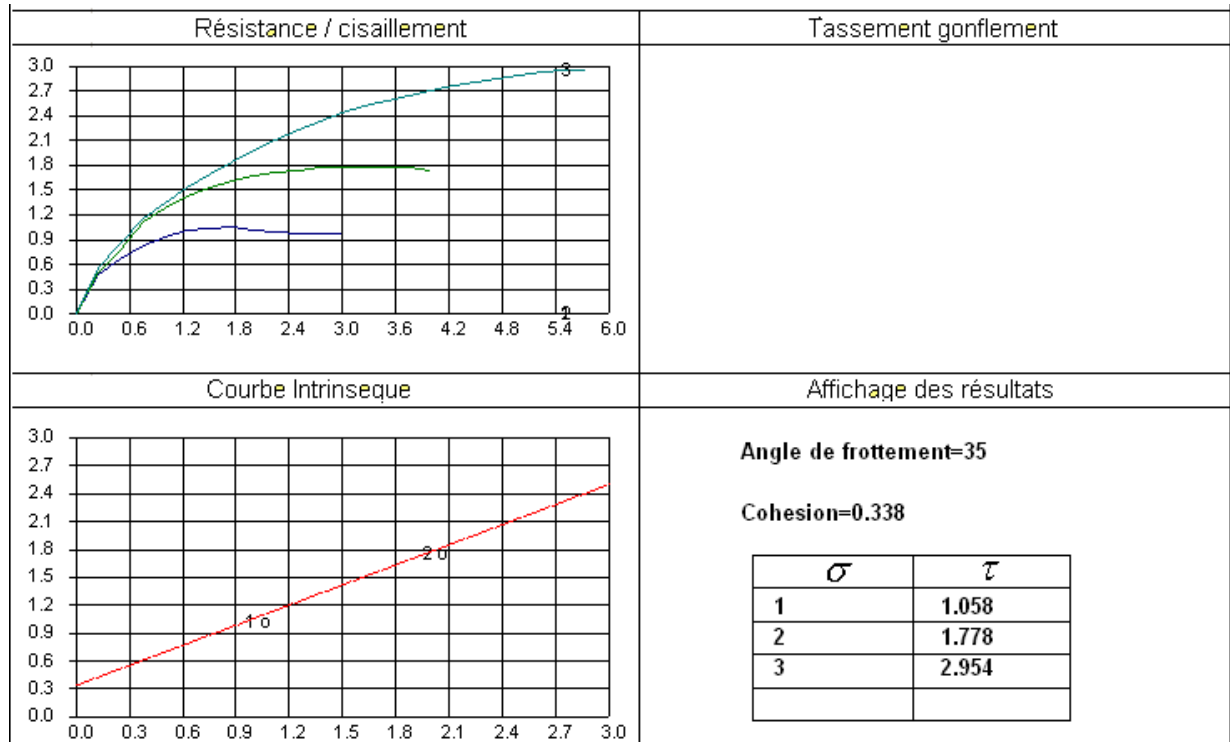
**Tableau3.10 :** Essai de cisaillement Sol +12% Marbre

Contrainte $\delta$ (kg/cm <sup>2</sup> )	1	2	3
Masse humide+ trousse(g)	154.6	155	155.8
Masse de la trousse (g)	46.5	46.5	46.5
Masse nette de l'éprouvette (g)	108.1	108.5	109.3
Volume de l'éprouvette (g)	55.67	55.67	55.67
N° de la tare	RH	RH	RH
Masse totale humide + tare(g)	250	250	250
Masse totale sèche + tare(g)	235.3	235.3	235.3
Masse de la tare(g)	40.6	40.6	40.6
Teneur en eau initial $w_i$ (%)	7.6	7.6	7.6
Teneur en eau de saturation(%)	18.25	18.24	17.94
Teneur en eau moyenne(%)	7.55	7.55	7.55
Degré de saturation $S_r$ (%)	41.36	41.39	42.08
Masse volumique humide $\gamma_h$ (g/cm <sup>3</sup> )	1.94	1.95	1.96
Masse volumique sèche $\gamma_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	1.80	1.81	1.82



**Tableau1 :**Le premier essai de cisaillement Sol +12% Marbre

Contrainte normale (bars)	1	2	3
Contrainte de cisaillement( bars)	1.058	1.778	2.954
Angle de frottement $\phi$ (°)	35		
Cohésion C(bars)	0.338		

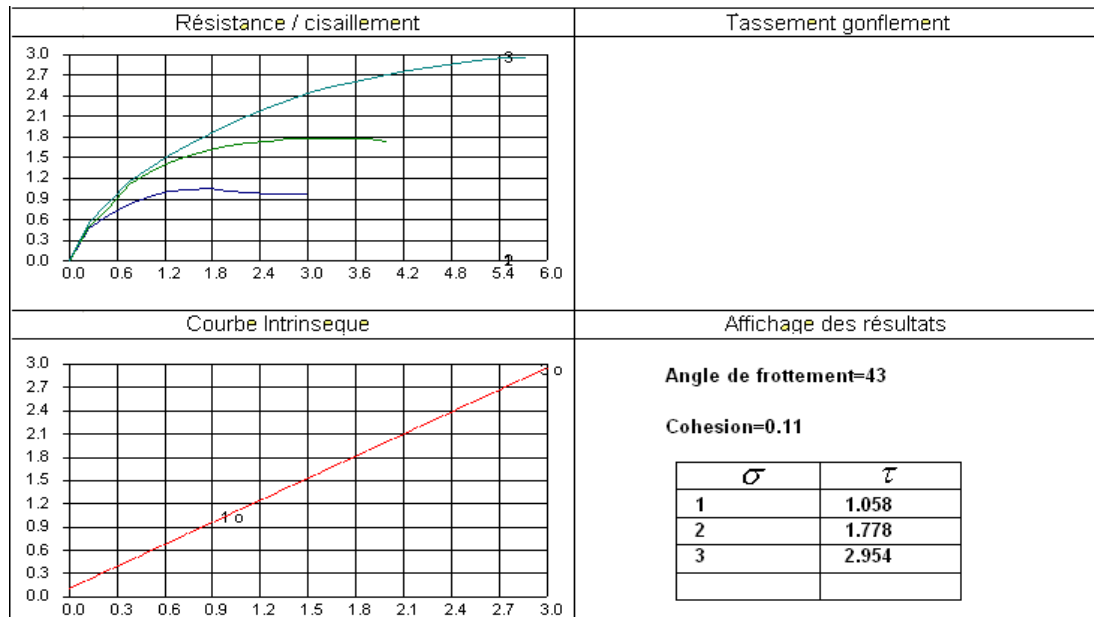


**Figure1:**Courbe de premier essai de cisaillement Sol +12% Marbre

**Tableau2 :**Ledeuxième essai de cisaillement Sol +9% Marbre

Contrainte normale (bars)	1	2	3
Contrainte de cisaillement( bars)	1.058	1.778	2.954
Angle de frottement $\phi$ (°)	43		
Cohésion C(bars)	0.11		

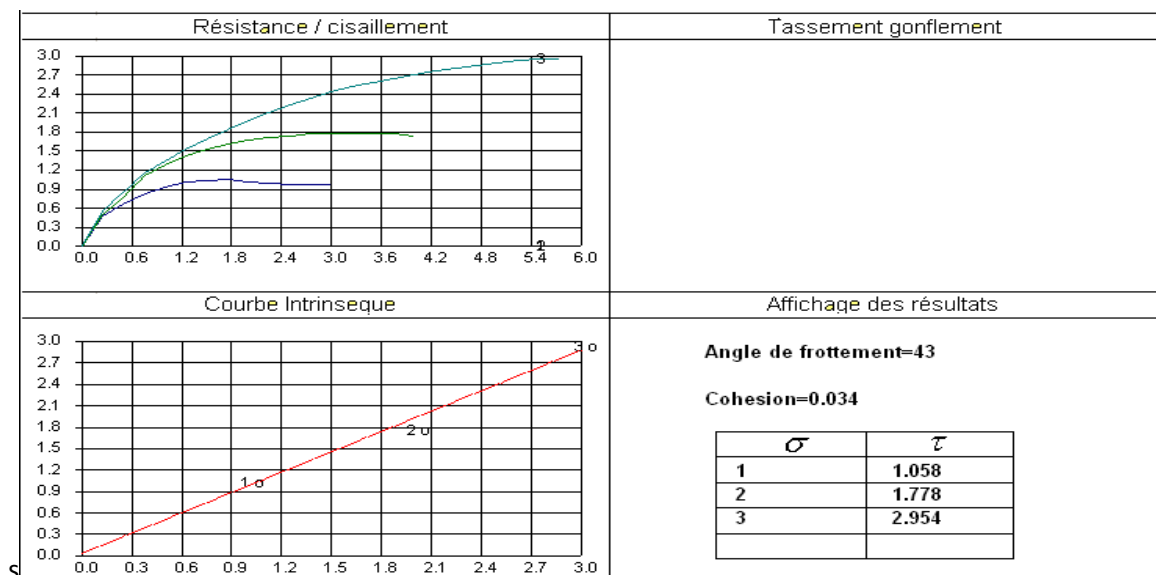




**Figure2 :** Courbe de deuxième essai de cisaillement Sol +12% Marbre

**Tableau2:** Letroisième essai de cisaillement Sol +12% Marbre

Contrainte normale (bars)	1	2	3
Contrainte de cisaillement( bars)	1.058	1.778	2.954
Angle de frottement $\phi$ (°)	43		
Cohésion C(bars)	0.034		



**Figure3 :** Courbe de troisième essai de cisaillement Sol +12% Marbre.

D'après l'essai de cisaillement pour sol+12% marbre nous avons trouvé que l'angle de frottement égale **40.33°** et la cohésion égale **0.160 bars**.



Tableau3.11 : Essai de cisaillement Sol +15% Marbre

Contrainte $\delta$ (kg/cm <sup>2</sup> )	1	2	3
Masse humide+ trousse(g)	152	152.6	153
Masse de la trousse (g)	46.5	46.5	46.5
Masse nette de l'éprouvette (g)	105.5	106.1	106.5
Volume de l'éprouvette (g)	55.67	55.67	55.67
N° de la tare	A3	A3	A3
Masse totale humide + tare(g)	250	250	250
Masse totale sèche + tare(g)	236.5	236.5	236.5
Masse de la tare(g)	46.4	46.5	46.4
Teneur en eau initial wi (%)	7.1	7.1	7.1
Teneur en eau de saturation(%)	19.5	19.2	19.2
Teneur en eau moyenne(%)	7.1	7.1	7.1
Degré de saturation Sr(%)	36	37	37
Masse volumique humide $\gamma_h$ (g/cm <sup>3</sup> )	1.90	1.91	1.91
Masse volumique sèche $\gamma_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	1.77	1.78	1.78

Tableau1:Lepremier essai de cisaillement Sol +15% Marbre

Contrainte normale (bars)	1	2	3
Contrainte de cisaillement( bars)	1.555	2.064	2.946
Angle de frottement $\phi$ (°)	26		
Cohésion C(bars)	1.046		

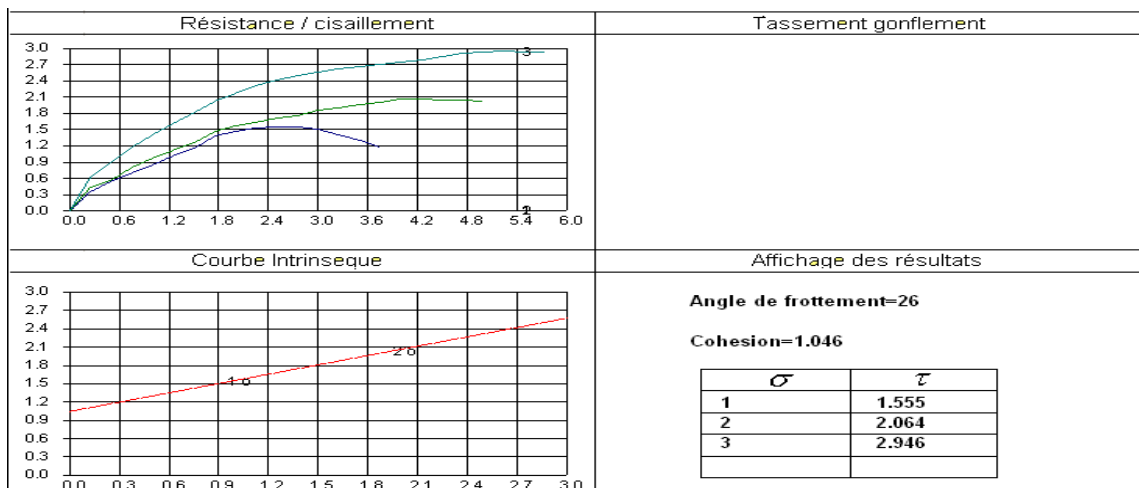
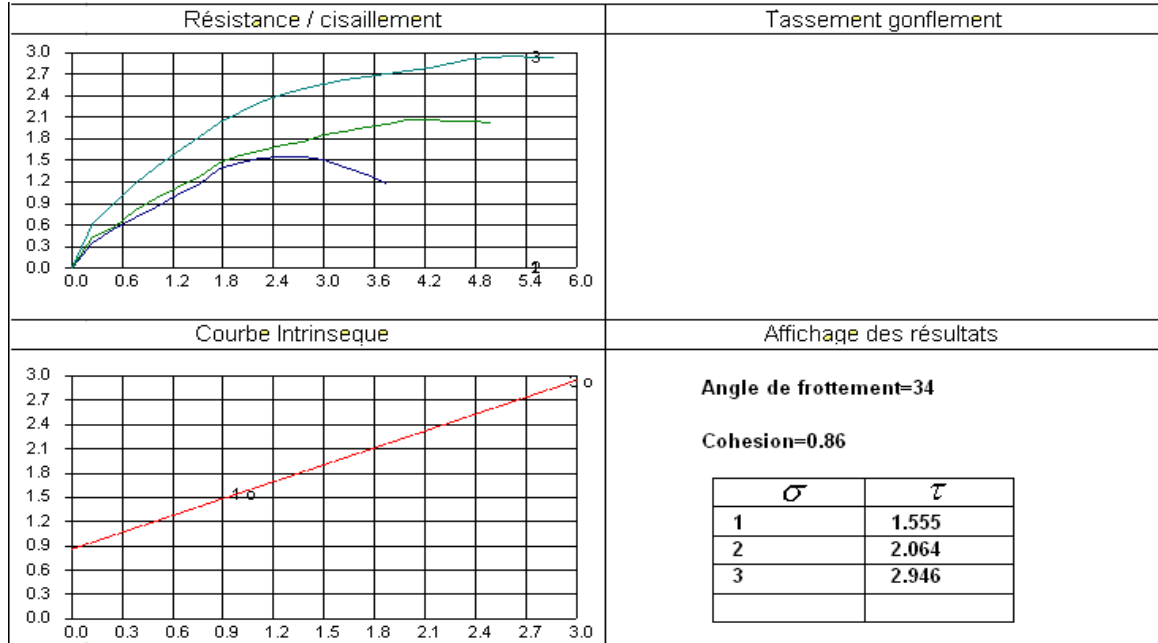


Figure1 :Courbe de premier essai de cisaillement Sol +15% Marbre.



**Tableau2:**Le deuxième essai de cisaillement Sol +15% Marbre

<b>Contrainte normale (bars)</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
<b>Contrainte de cisaillement( bars)</b>	1.555	2.064	2.946
<b>Angle de frottement<math>\phi</math>(°)</b>	34		
<b>Cohésion C(bars)</b>	0.86		

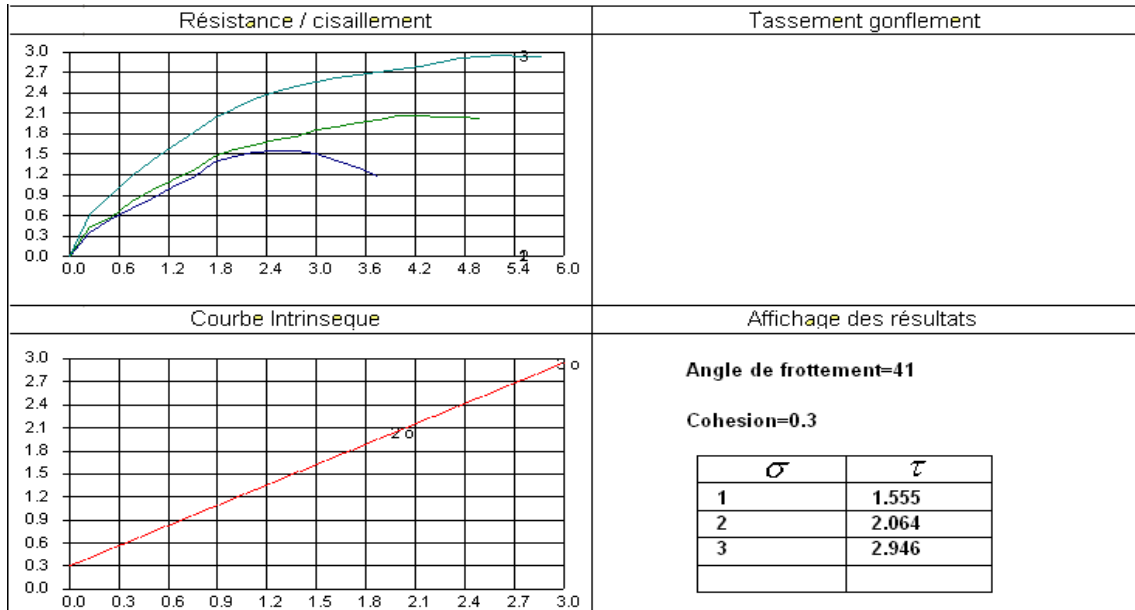


**Figure2 :**Courbe de deuxième essai de cisaillement Sol +15% Marbre.

**Tableau3:**Le troisième essai de cisaillement Sol +15% Marbre

<b>Contrainte normale (bars)</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
<b>Contrainte de cisaillement( bars)</b>	1.555	2.064	2.946
<b>Angle de frottement<math>\phi</math>(°)</b>	41		
<b>Cohésion C(bars)</b>	0.3		





**Figure3 :** Courbe de troisième essai de cisaillement Sol +15% Marbre.

D'après l'essai de cisaillement pour sol+15% marbre nous avons trouvé que l'angle de frottement égale  $34^\circ$  et la cohésion égale **0.750bars**.

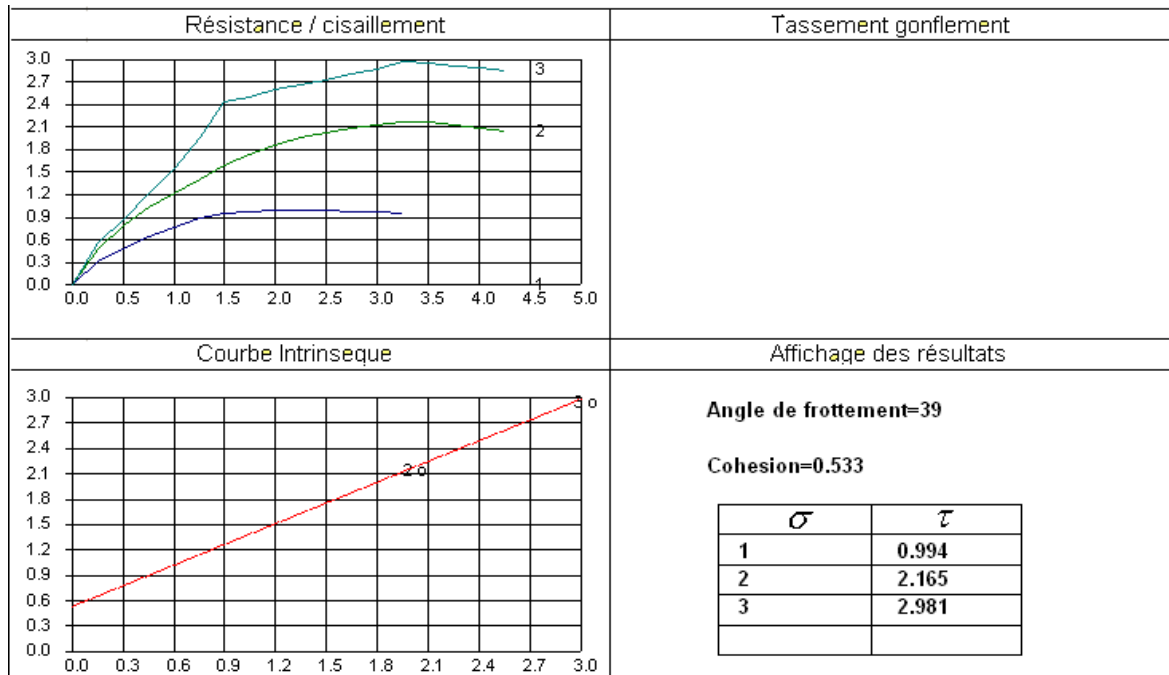
**Tableau 3.12:** Essai de cisaillement Sol +18% Marbre

Contrainte $\delta$ (kg/cm <sup>2</sup> )	1	2	3
Masse humide+ trousse(g)	155.6	156.3	156.7
Masse de la trousse (g)	46.5	46.5	46.5
Masse nette de l'éprouvette (g)	109.1	109.8	110.2
Volume de l'éprouvette (g)	55.67	55.67	55.67
N° de la tare	A	A	A
Masse totale humide + tare(g)	250	250	250
Masse totale sèche + tare(g)	233	233	233
Masse de la tare(g)	41.6	41.6	41.6
Teneur en eau initial $w_i$ (%)	8.8	8.8	8.8
Teneur en eau de saturation(%)	18	18	18
Teneur en eau moyenne(%)	8.8	8.8	8.8
Degré de saturation $S_r$ (%)	49.3	49.3	49.3
Masse volumique humide $\gamma_h$ (g/cm <sup>3</sup> )	1.96	1.97	1.98
Masse volumique sèche $\gamma_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	1.80	1.80	1.81



**Tableau1:**Le premier essai de cisaillement Sol +18% Marbre

Contrainte normale (bars)	1	2	3
Contrainte de cisaillement (bars)	0.994	2.165	2.981
Angle de frottement $\phi$ (°)	39		
Cohésion C(bars)	0.533		



**Figure1 :**Courbe de premier essai de cisaillement Sol +18% Marbre.

D'après l'essai de cisaillement pour **sol+18%** marbre nous avons trouvé que l'angle de frottement égale **39°** et la cohésion égale **0.533 bars**.

**Tableau3.13 :** Essai de cisaillement Sol +21% Marbre

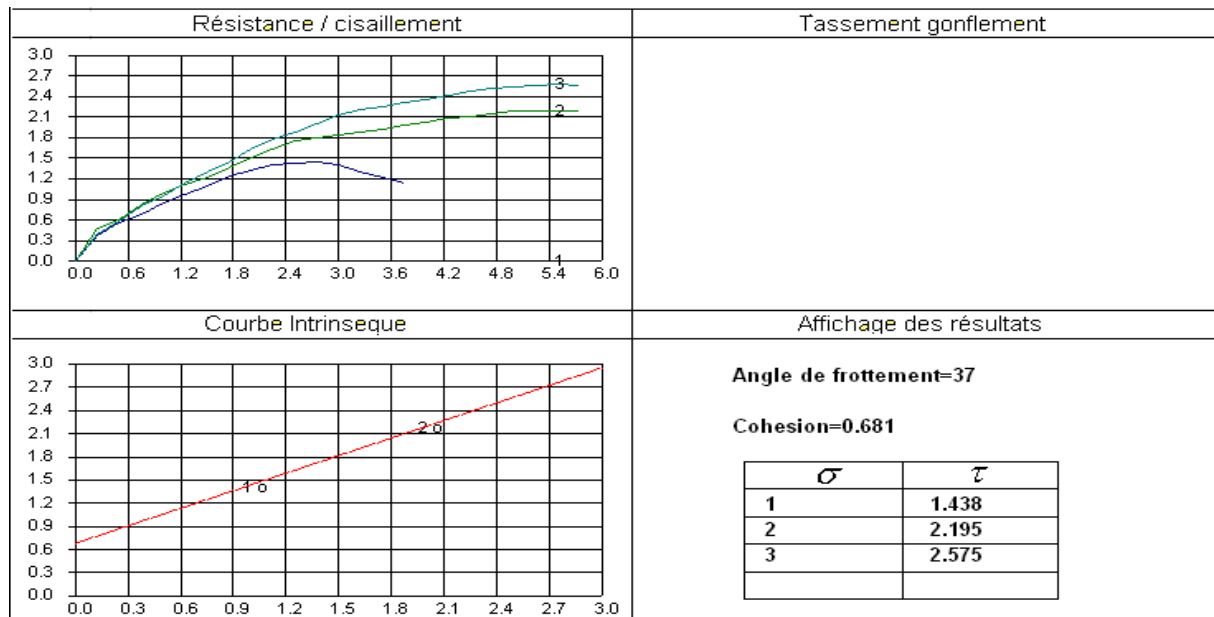
Contrainte $\delta$ (kg/cm <sub>2</sub> )	1	2	3
Masse humide+ trousse(g)	152	152.4	152.6
Masse de la trousse (g)	46.5	46.5	46.5
Masse nette de l'éprouvette (g)	105.5	105.9	106.1
Volume de l'éprouvette (g)	55.67	55.67	55.67
N° de la tare	A	A	A
Masse totale humide + tare(g)	250	250	250
Masse totale sèche + tare(g)	233.7	233.7	233.7
Masse de la tare(g)	41.6	41.6	41.6
Teneur en eau initial $w_i$ (%)	8.5	8.5	8.5
Teneur en eau de saturation(%)	20.1	20.1	20.1
Teneur en eau moyenne(%)	8.5	8.5	8.5
Degré de saturation $S_r$ (%)	42	42	43



Masse volumique humide $\gamma_h$ (g/cm <sup>3</sup> )	1.90	1.90	1.91
Masse volumique sèche $\gamma_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	1.75	1.75	1.76

**Tableau1:**Le premier essai de cisaillement Sol +21% Marbre

Contrainte normale (bars)	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
Contrainte de cisaillement( bars)	1.438	2.195	2.575
Angle de frottement $\phi$ (°)	37		
Cohésion C(bars)	0.681		

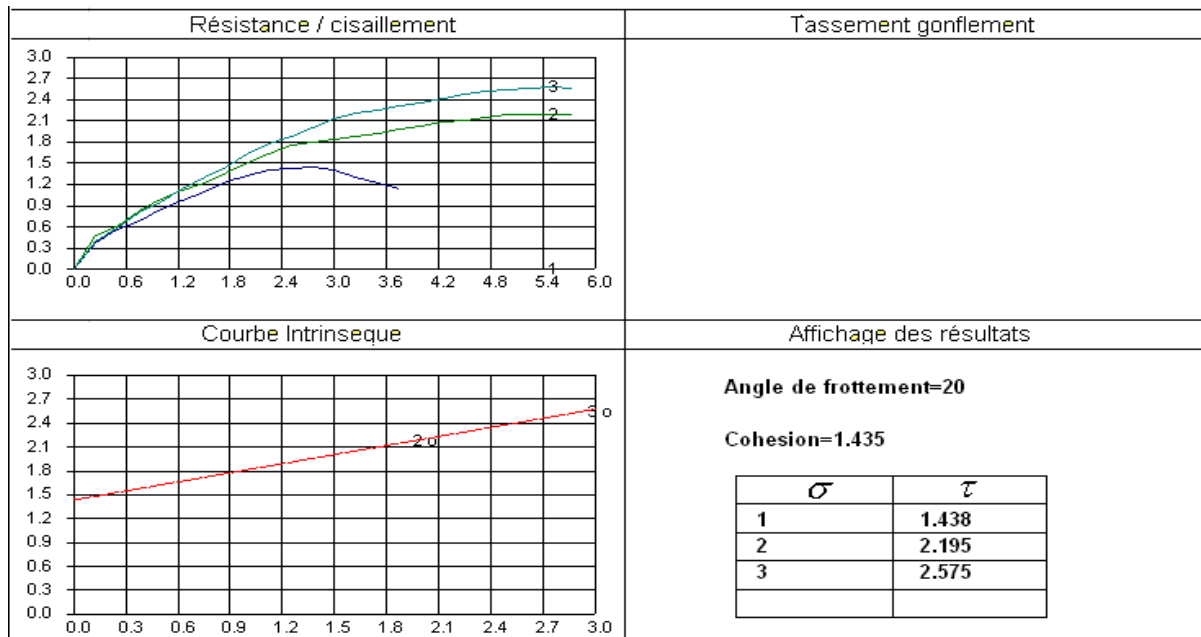


**Figure1 :**Courbe de premier essai de cisaillement Sol +21% Marbre.

**Tableau2:**Le deuxième essai de cisaillement Sol +21% Marbre

Contrainte normale (bars)	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
Contrainte de cisaillement( bars)	1.438	2.195	2.575
Angle de frottement $\phi$ (°)	20		
Cohésion C(bars)	1.435		

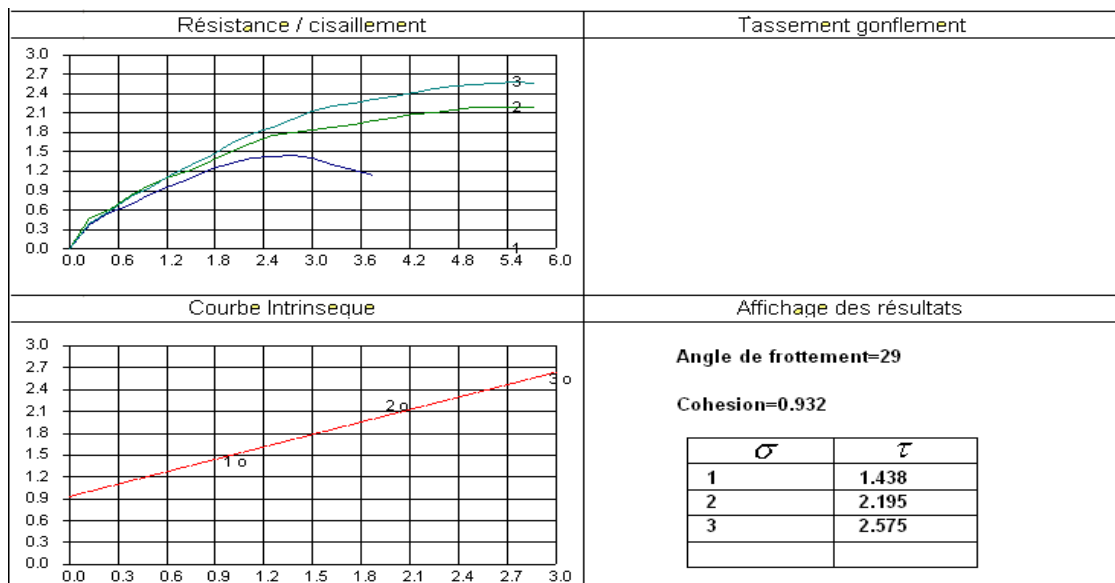




**Figure2 :** Courbe de deuxième essai de cisaillement Sol +21% Marbre.

**Tableau3:** Letroisièmeessai de cisaillement Sol +21% Marbre

Contrainte normale (bars)	1	2	3
Contrainte de cisaillement( bars)	1.438	2.195	2.575
Angle de frottement $\phi$ (°)	29		
Cohésion C(bars)	0.932		



**Figure3:** Courbe de troisième essai de cisaillement Sol +21% Marbre.



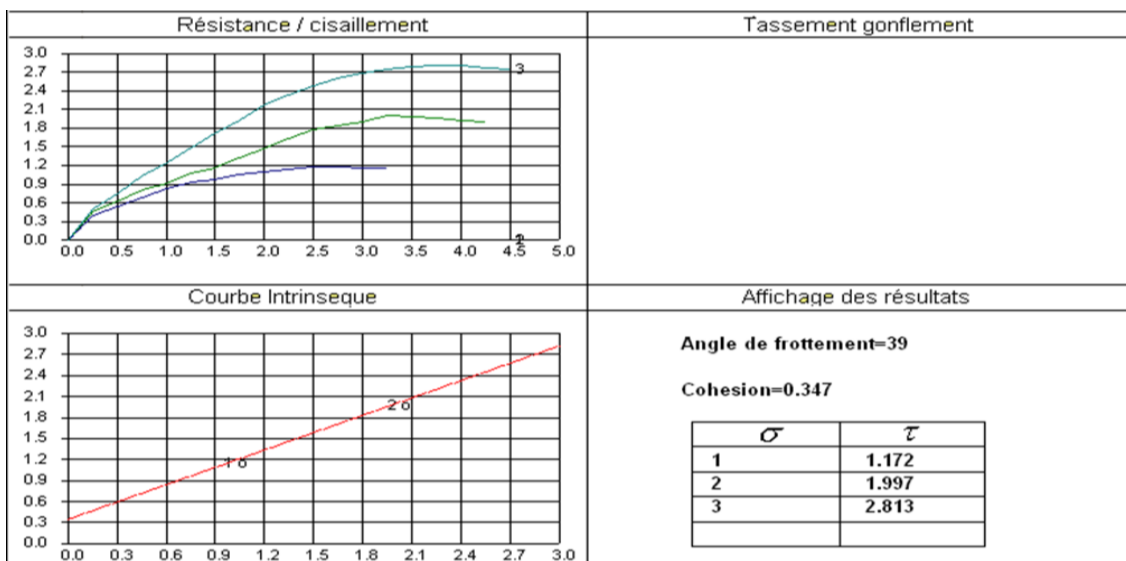
D'après l'essai de cisaillement pour sol+21% marbre nous avons trouvé que l'angle de frottement égale **29°** et la cohésion égale **0.932 bars**

**Tableau2:**Essai de cisaillement Sol +24% Marbre

Contrainte $\delta$ (kg/cm <sup>2</sup> )	1	2	3
Masse humide+ trousse(g)	150	150.3	150.8
Masse de la trousse (g)	46.5	46.5	46.5
Masse nette de l'éprouvette (g)	103.5	103.8	104.3
Volume de l'éprouvette (g)	55.67	55.67	55.67
N° de la tare	B	B	B
Masse totale humide + tare(g)	250	250	250
Masse totale sèche + tare(g)	233.7	233.7	233.7
Masse de la tare(g)	43.8	43.8	43.8
Teneur en eau initial $w_i$ (%)	8.6	8.6	8.6
Teneur en eau de saturation(%)	21.5	21.5	21.1
Teneur en eau moyenne(%)	8.6	8.6	8.6
Degré de saturation $S_r$ (%)	40	40	41
Masse volumique humide $\gamma_h$ (g/cm <sup>3</sup> )	1.86	1.86	1.87
Masse volumique sèche $\gamma_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	1.71	1.71	1.72

**Tableau1:**Le premier essai de cisaillement Sol +24% Marbre

Contrainte normale (bars)	1	2	3
Contrainte de cisaillement( bars)	1.172	1.997	2.813
Angle de frottement $\phi$ (°)	39		
Cohésion C(bars)	0.347		

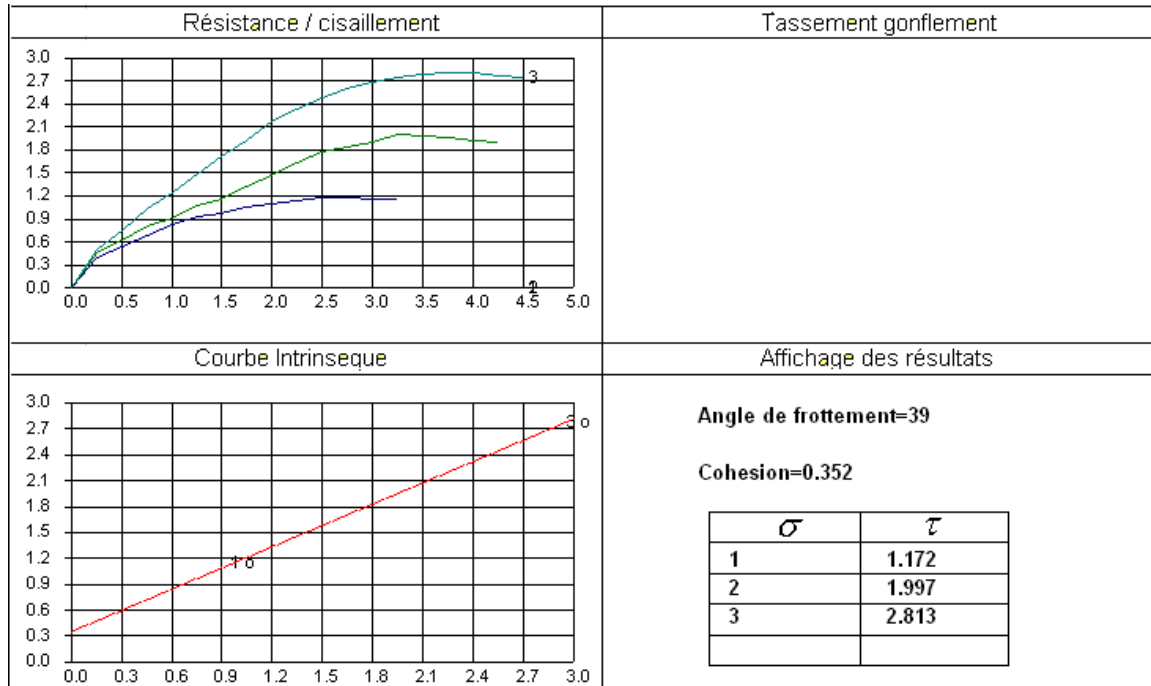


**Figure1 :**Courbe de premier essai de cisaillement Sol +24% Marbre.



**Tableau2:**Ledeuxièmeessai de ciaiillement Sol +24% Marbre

Contrainte normale (bars)	1	2	3
Contrainte de cisaillement( bars)	1.172	1.997	2.813
Angle de frottement $\phi$ (°)	39		
Cohésion C(bars)	0.352		

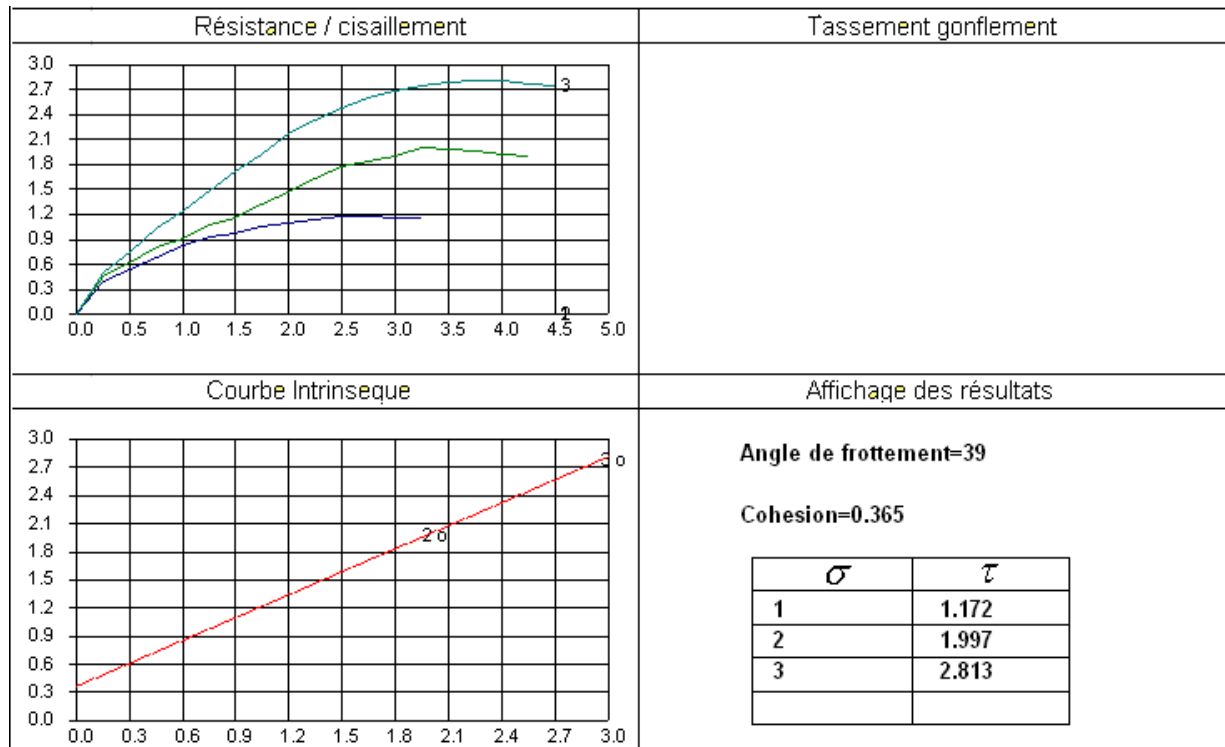


**Figure2:**Courbe dedeuxième essai de ciaiillement Sol +24% Marbre.

**Tableau3:**Letrosièmeessai de ciaiillement Sol +24% Marbre

Contrainte normale (bars)	1	2	3
Contrainte de cisaillement( bars)	1.172	1.997	2.813
Angle de frottement $\phi$ (°)	39		
Cohésion C(bars)	0.365		





**Figure3:**Courbe de troisième essai de cisaillement Sol +24% Marbre.

D'après l'essai de cisaillement pour **sol+24%** marbre nous avons trouvé que l'angle de frottement égale**39°** et la cohésion égale **0.357 bars**.

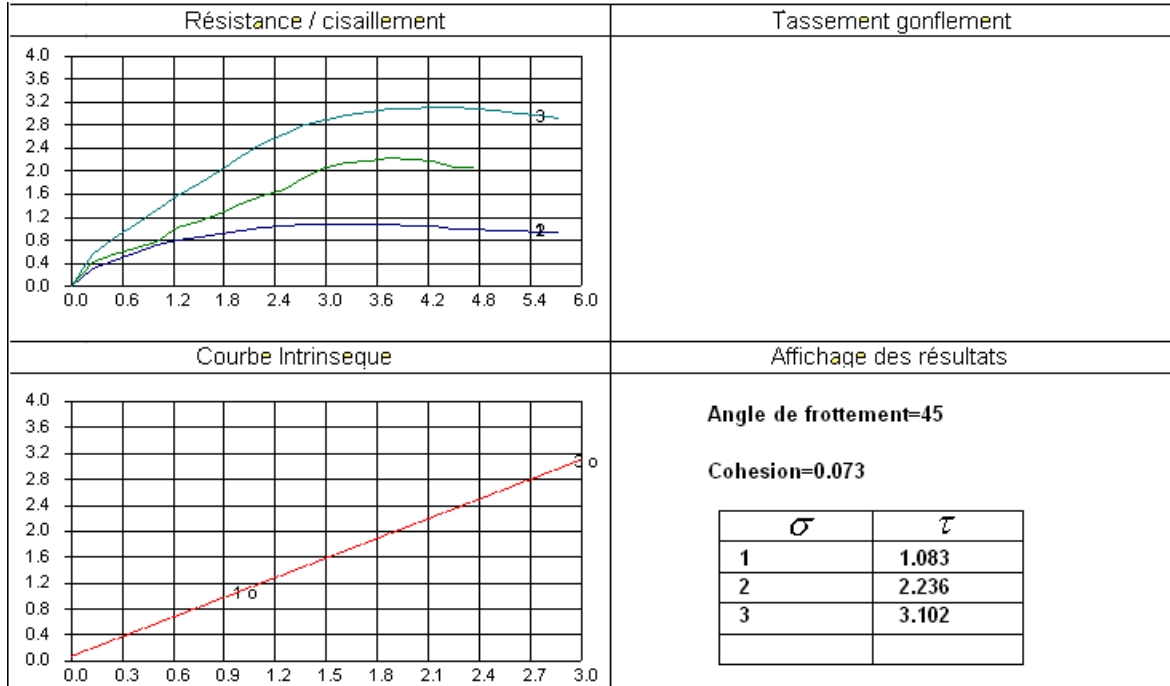
**Tableau 3.15:** Essai de cisaillement Sol +27% Marbre

Contrainte $\delta$ (kg/cm <sub>2</sub> )	1	2	3
Masse humide+ trousse(g)	154	154.5	155
Masse de la trousse (g)	46.5	46.5	46.5
Masse nette de l'éprouvette (g)	107.5	108	108.5
Volume de l'éprouvette (g)	55.67	55.67	55.67
N° de la tare	CS	CS	CS
Masse totale humide + tare(g)	250	250	250
Masse totale sèche + tare(g)	232.2	232.2	232.2
Masse de la tare(g)	43.2	43.2	43.2
Teneur en eau initial wi (%)	9.4	9.4	9.4
Teneur en eau de saturation(%)	19.8	19.5	19.2
Teneur en eau moyenne(%)	9.4	9.4	9.4
Degré de saturation Sr(%)	47	48	49
Masse volumique humide $\gamma_h$ (g/cm <sub>3</sub> )	1.93	1.94	1.95
Masse volumique sèche $\gamma_d$ (g/cm <sub>3</sub> )	1.76	1.77	1.78



**Tableau1:**Letrosièmeessai de ciaiilement Sol +27% Marbre

Contrainte normale (bars)	1	2	3
Contrainte de cisaillement( bars)	1.083	2.236	3.102
Angle de frottement $\phi$ (°)	45		
Cohésion C(bars)	0.073		

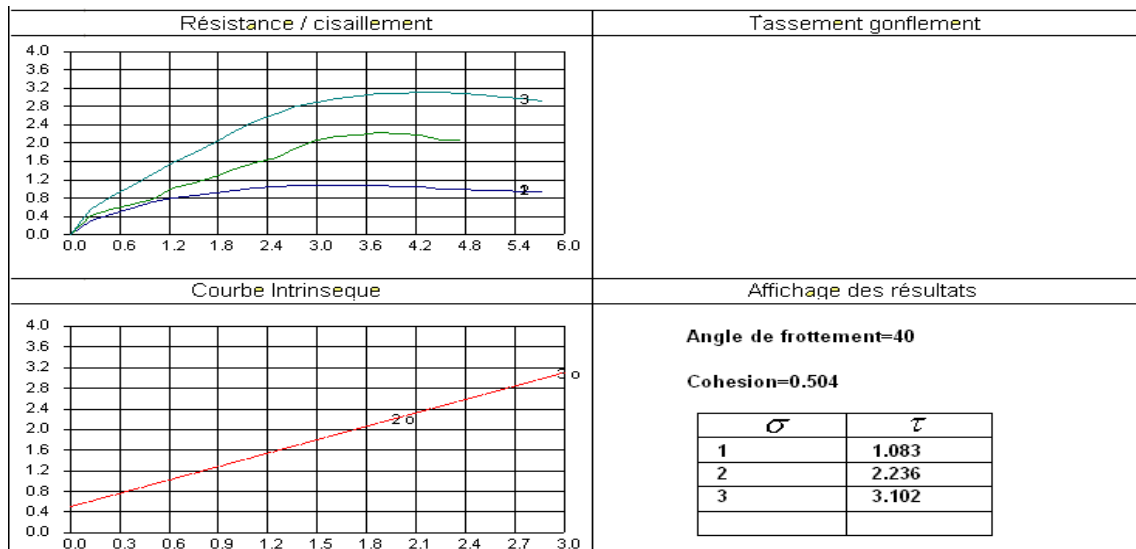


**Figure1:**Courbe depremieressai de ciaiilement Sol +27% Marbre.

**Tableau2:**Ledeuxième essai de ciaiilement Sol +27% Marbre

Contrainte normale (bars)	1	2	3
Contrainte de cisaillement( bars)	1.083	2.236	3.102
Angle de frottement $\phi$ (°)	40		
Cohésion C(bars)	0.504		

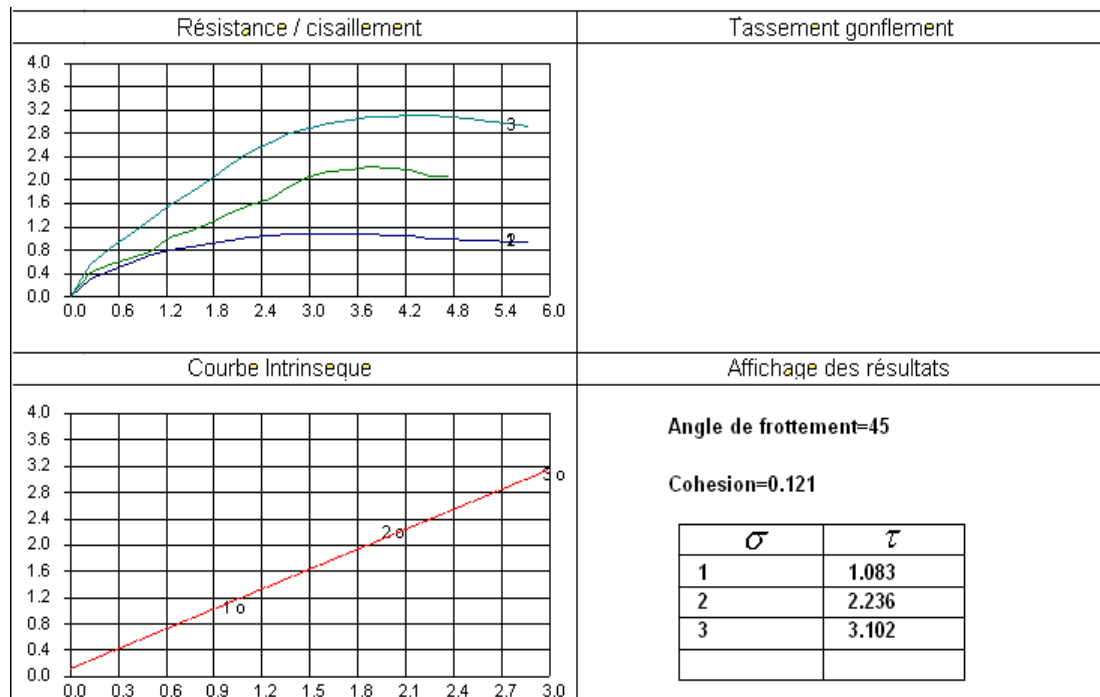




**Figure2:**Courbe dedeuxièmeessai de caillement Sol +27% Marbre.

**Tableau3:**Letrosièmeessai de caillement Sol +27% Marbre

Contrainte normale (bars)	1	2	3
Contrainte de cisaillement( bars)	1.083	2.236	3.102
Angle de frottement $\phi$ (°)	45		
Cohésion C(bars)	0.121		



**Figure3:**Courbe de troisième essai de caillement Sol +27% Marbre.



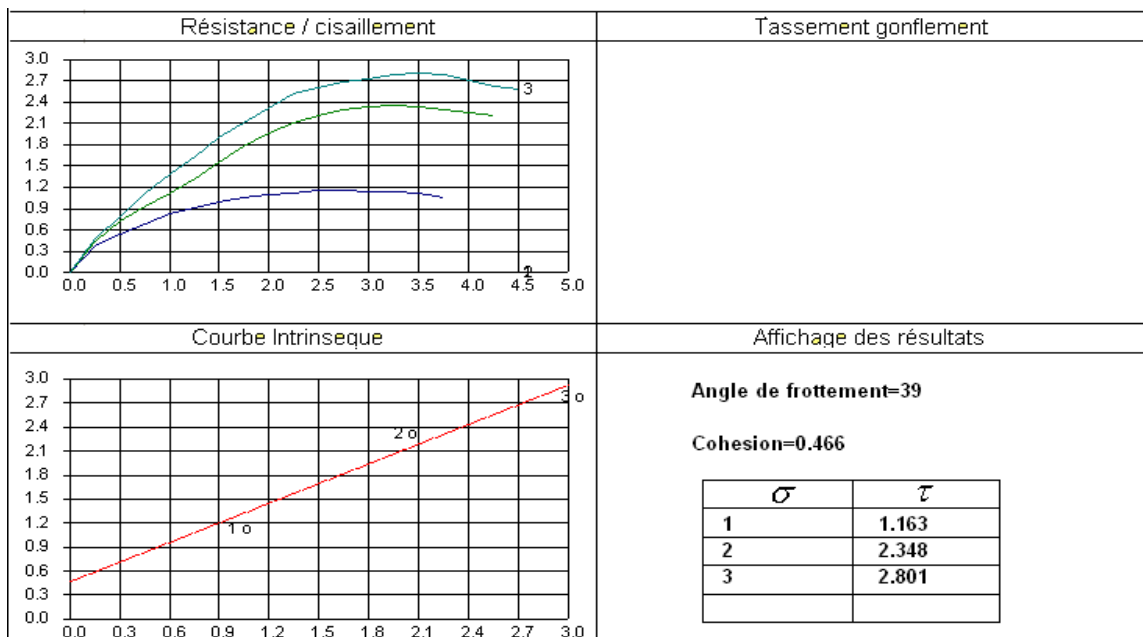
D'après l'essai de cisaillement pour sol+27% marbre nous avons trouvé que l'angle de frottement égale  $45^\circ$  et la cohésion égale **0.232 bars**.

**Tableau 3.16:** Essai de cisaillement Sol +30% Marbre

Contrainte $\delta$ (kg/cm <sup>2</sup> )	1	2	3
Masse humide+ trousse(g)	158	158.3	158.9
Masse de la trousse (g)	46.5	46.5	46.5
Masse nette de l'éprouvette (g)	111.5	111.8	112.4
Volume de l'éprouvette (g)	55.67	55.67	55.67
N° de la tare	XA	XA	XA
Masse totale humide + tare(g)	250	250	250
Masse totale sèche + tare(g)	232.1	232.1	232.1
Masse de la tare(g)	43.6	43.6	43.6
Teneur en eau initial $w_i$ (%)	9.5	9.5	9.5
Teneur en eau de saturation(%)	17.6	17.3	17.3
Teneur en eau moyenne(%)	9.5	9.5	9.5
Degré de saturation $S_r$ (%)	54	55	55
Masse volumique humide $\gamma_h$ (g/cm <sup>3</sup> )	2.00	2.01	2.02
Masse volumique sèche $\gamma_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	1.83	1.84	1.84

**Tableau1:**Le premier essai de cisaillement Sol +30% Marbre

Contrainte normale (bars)	1	2	3
Contrainte de cisaillement( bars)	1.163	2.348	2.801
Angle de frottement $\phi$ (°)	39		
Cohésion C(bars)	0.466		

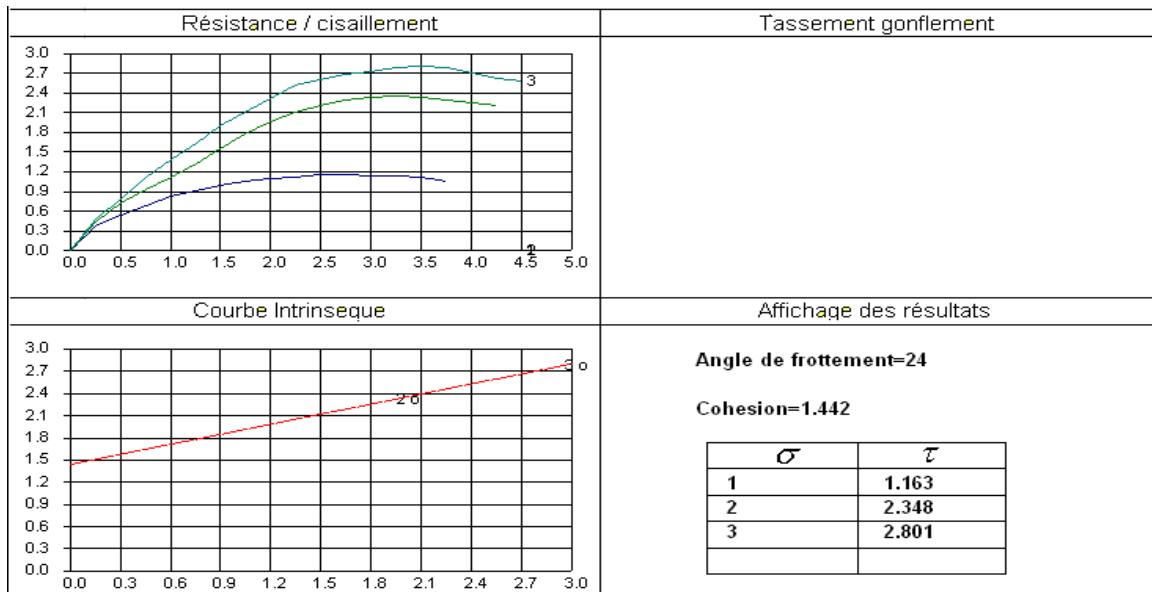


**Figure1:**Courbe de premier essai de cisaillement Sol +30% Marbre.



**Tableau2:**Ledeuxième essai de ciallement Sol +30% Marbre

<b>Contrainte normale (bars)</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
<b>Contrainte de cisaillement( bars)</b>	1.163	2.348	2.801
<b>Angle de frottement<math>\phi</math>(°)</b>	24		
<b>Cohésion C(bars)</b>	1.442		

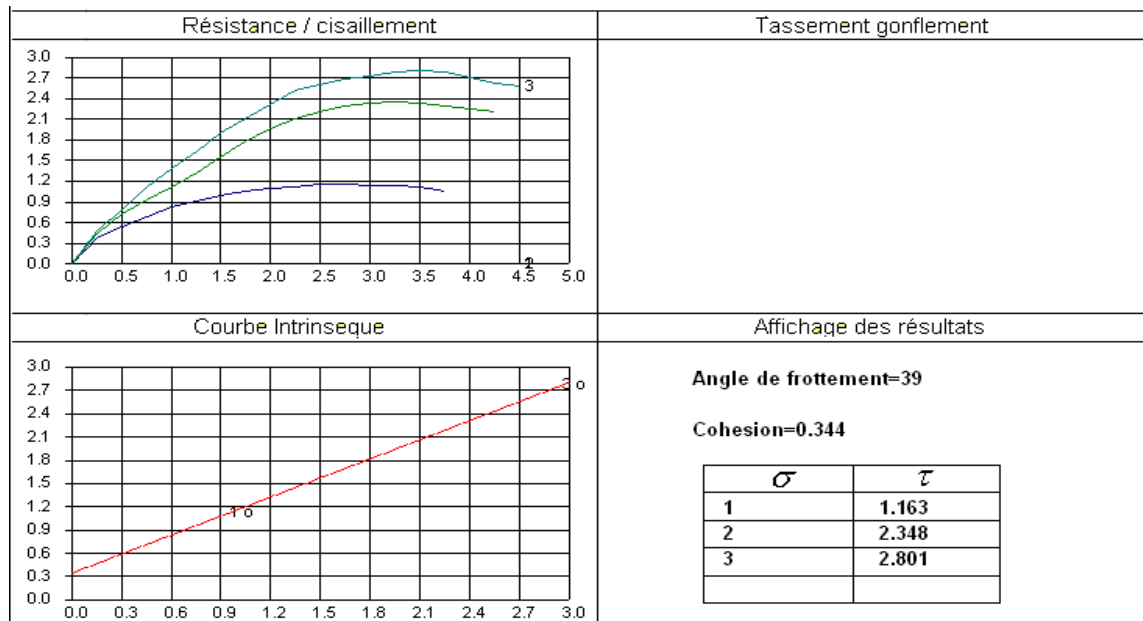


**Figure2:**Courbe de deuxième essai de ciallement Sol +30% Marbre.

**Tableau3:**Letrosièmeessai de ciallement Sol +30% Marbre

<b>Contrainte normale (bars)</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
<b>Contrainte de cisaillement( bars)</b>	1.163	2.348	2.801
<b>Angle de frottement<math>\phi</math>(°)</b>	24		
<b>Cohésion C(bars)</b>	1.442		





**Figure3:**Courbe de troisième essai de cisaillement Sol +30% Marbre.

D'après l'essai de cisaillement pour sol+30% marbre nous avons trouvé que l'angle de frottement égale **34°** et la cohésion égale **0.750 bars**.



### 3.3 Essais d'Atterberg :

Tableau3.17: limite de liquidité pour sol + 3% Marbre

N° essai	Essai 1		Essai 2		Essai 3		Essai 4	
Nombre de coups	17		21		26		30	
N° de la tare	ABN	ABV	ABI	AS	VF	VS	3	SR
Masse de l'ensemble (échan humide +Tare) m2(g)	23.20	21.11	21.72	21.59	22.59	22.26	22.56	22.16
Tare m1(g)	18.36	16.31	16.96	16.86	16.88	17.50	17.83	17.38
Masse de l'échan humide m=m2 – m1 (g)	4.84	4.80	4.76	4.73	4.71	4.76	4.73	4.78
Masse de l'échan sec mw= m2-m3	3.51	3.48	3.48	3.46	3.46	3.5	3.5	3.54
Masse de l'eau(g)	1.33	1.32	1.28	1.27	1.25	1.26	1.23	1.24
Teneur en eau(%)	37.89	37.9	36.78	36.7	36.12	36	35.14	35.2
Moyenne(%)	37.9		36.7		36		35	
Wl	36							

Tableau3.17: limite de plasticité pour sol + 3% Marbre

Essai limite de plasticité		
N° de la tare	CZ	XE
Masse de l'ensemble (échan humide +Tare) m2	17.74	18.9
Tare m1(g)	16.10	17.38
Masse de l'échan humide m=m2 – m1 (g)	1.64	1.61
Masse de l'échan sec mw= m2-m3	1.35	1.33
Masse de l'eau(g)	2.9	2.8
Teneur en eau(%)	21.48	21.05
Moyenne(%)	21.2	
Wp	21	

L'indice de plasticité :  $I_p = W_L - W_P = 15$



**Tableau3.19:** limite de liquidité pour sol + 6% Marbre

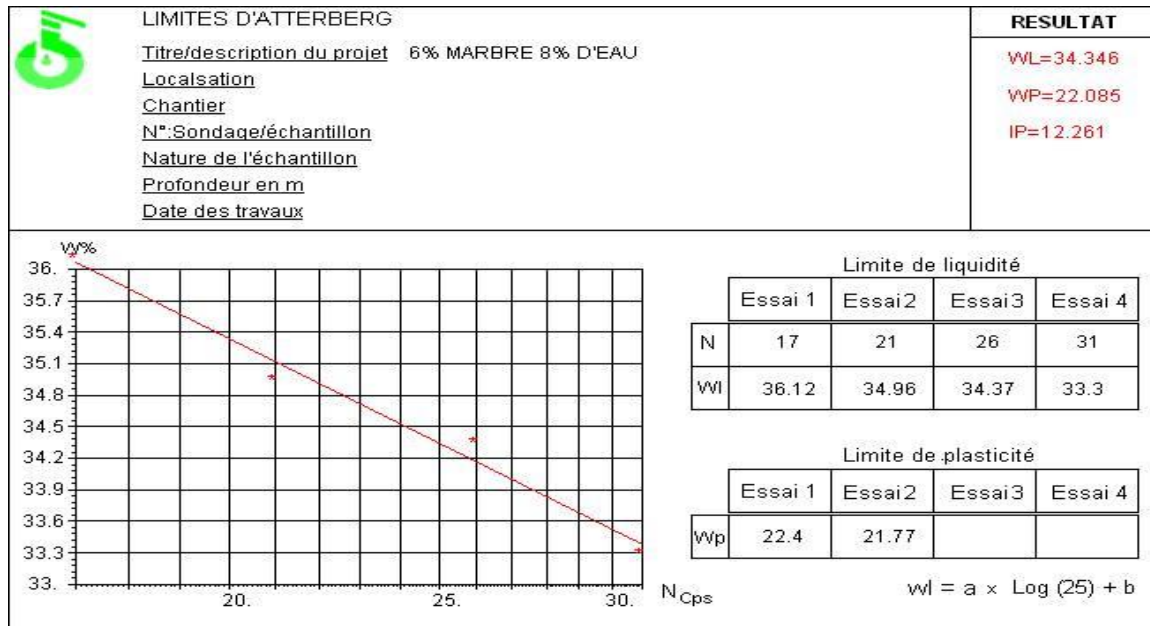
N° essai	Essai 1		Essai 2		Essai 3		Essai 4	
Nombre de coups	17		21		26		31	
N° de la tare	AQ	3	AD	BY	VS	CI	XW	VY
Masse de l'ensemble (échan humide +Tare) m2(g)	23.09	24.61	21.40	23.42	27.53	24.94	23.06	23.48
Tare m1(g)	16.34	17.83	14.79	16.79	17.50	16.40	17.16	17.09
Masse de l'échan humide m=m2 – m1 (g)	6.75	6.78	6.61	6.63	10.03	8.34	5.90	6.39
Masse de l'échan sec mw= m2-m3	4.96	4.98	4.9	4.91	7.46	6.21	4.42	4.8
Masse de l'eau(g)	1.79	1.8	1.71	1.72	2.57	2.13	1.48	1.59
Teneur en eau(%)	36.08	36.14	34.9	35.03	34.45	34.29	33.4	33.12
Moyenne(%)	36.1		35		34.3		33.3	
Wl	35							

**Tableau 3.20 :** limite de plasticité sol + 6% Marbre

Essai limite de plasticité		
N° de la tare	ABI	HG
<b>Masse de l'ensemble (échan humide +Tare) m2</b>	18.49	23.05
<b>Tare m1(g)</b>	16.96	21.54
<b>Masse de l'échan humide m=m2 – m1 (g)</b>	15.3	15.1
<b>Masse de l'échan sec mw= m2-m3</b>	1.25	1.24
<b>Masse de l'eau(g)</b>	2.8	2.7
<b>Teneur en eau(%)</b>	22.4	21.77
<b>Moyenne(%)</b>	22.08	
<b>Wp</b>	22	

L'indice de plasticité :  $I_p = W_L - W_P = 13$





**Figure3.9 : Limite d'Atterberge sol+6% Marbre**



**Tableau3.21:** limite de liquidité pour sol +9% Marbre

N° essai	Essai 1		Essai 2		Essai 3		Essai 4	
Nombre de coups	16		20		25		31	
N° de la tare	VC	CI	SR	XA	BB	SA	BT	BY
Masse de l'ensemble (échan humide +Tare) m2(g)	26.10	24.40	24.61	24.14	23.46	26.23	23.35	22.14
Tare m1(g)	18.15	16.40	17.38	16.86	17.09	17.72	16.83	16.79
Masse de l'échan humide m=m2 – m1 (g)	7.95	8.00	7.23	7.28	6.37	8.51	6.52	5.35
Masse de l'échan sec mw= m2-m3	5.75	5.79	5.28	5.32	4.68	6.24	4.82	3.96
Masse de l'eau(g)	2.20	2.21	1.95	1.96	1.69	2.27	1.70	1.39
Teneur en eau(%)	38.26	38.16	36.93	36.84	36.11	36.37	35.26	35.10
Moyenne(%)	38.2		36.9		36.2		35.2	
Wl	36							

**Tableau3.22:**limite de plasticité sol +9% Marbre.

<b>Essai limite de plasticité</b>		
<b>N° de la tare</b>	MD	VS
<b>Masse de l'ensemble (échan humide +Tare) m2</b>	18.20	18.54
<b>Tare m1(g)</b>	17.26	17.50
<b>Masse de l'échan humide m=m2 – m1 (g)</b>	0.94	1.04
<b>Masse de l'échan sec mw= m2-m3</b>	0.76	0.85
<b>Masse de l'eau(g)</b>	0.18	0.19
<b>Teneur en eau(%)</b>	23.68	22.35
<b>Moyenne(%)</b>	23.01	
<b>Wp</b>	23	

L'indice de plasticité :  $I_p = W_L - W_P = 13$



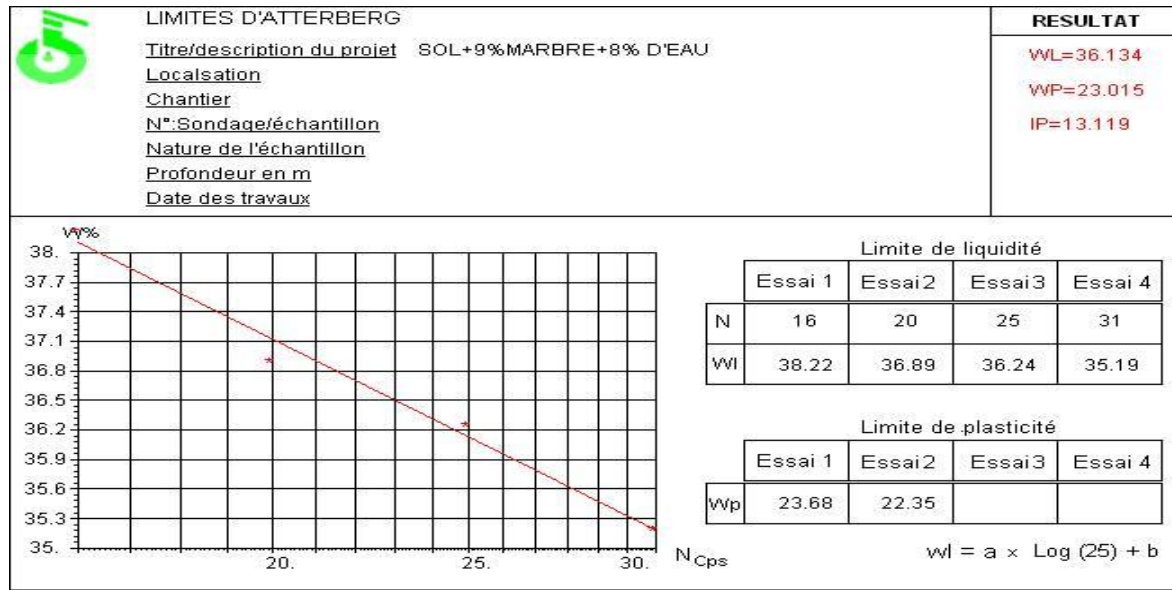


Figure3.10 : Limite d'Atterberge sol+9% Marbre



**Tableau3.23:** limite de liquidité pour sol +12% Marbre

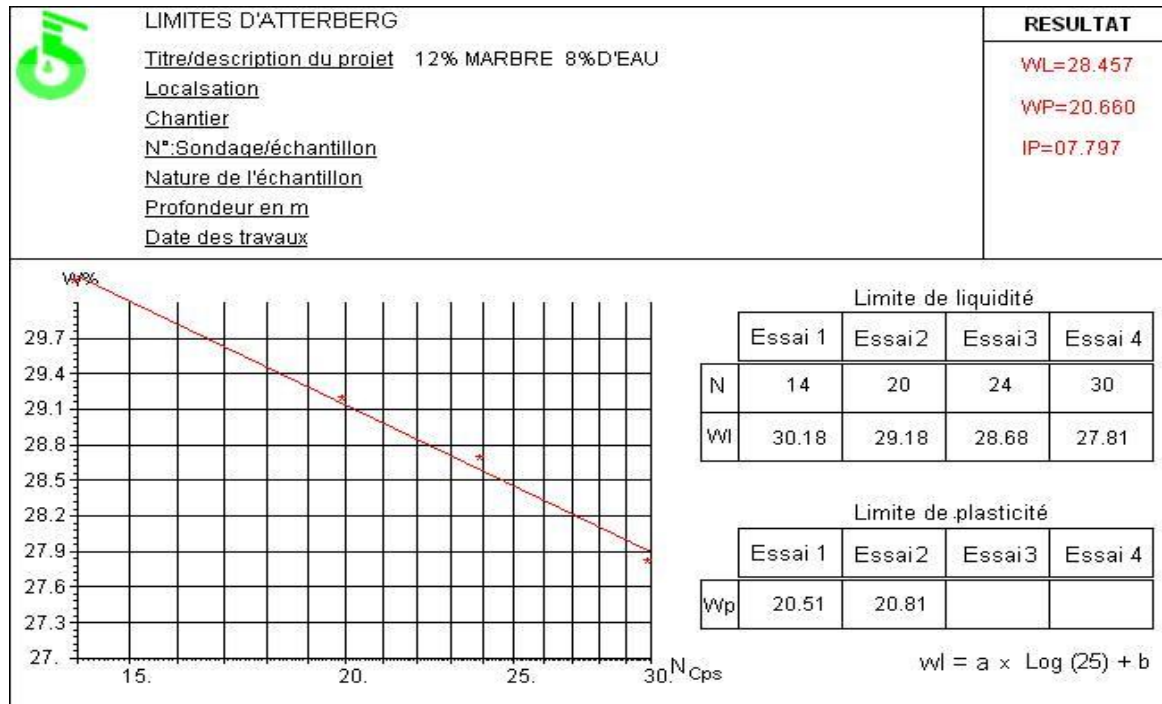
N° essai	Essai 1		Essai 2		Essai 3		Essai 4	
Nombre de coups	14		20		24		30	
N° de la tare	C2	C1	ABI	AS	VF	VS	3	SR
Masse de l'ensemble (échan humide +Tare) m2(g)	23.53	22.67	24.34	24.22	24.19	26.78	27.03	27.01
Tare m1(g)	16.07	15.25	16.96	16.86	16.88	17.50	17.83	17.78
Masse de l'échan humide m=m2 – m1 (g)	7.46	7.42	7.38	7.36	7.31	9.28	9.20	9.23
Masse de l'échan sec mw= m2-m3	5.73	5.70	5.71	5.70	5.69	7.20	7.20	7.22
Masse de l'eau(g)	1.73	1.72	1.67	1.66	1.62	20.8	2.00	2.01
Teneur en eau(%)	30.19	30.17	29.24	29.12	28.47	28.88	27.77	27.83
Moyenne(%)	30.1		29.2		28.6		27.8	
WL	29							

**Tableau 3.24 :** limite de plasticité sol +12% Marbre

<b>Essai limite de plasticité</b>		
<b>N° de la tare</b>	<b>CZ</b>	<b>K</b>
<b>Masse de l'ensemble (échan humide +Tare) m2</b>	18.92	17.33
<b>Tare m1(g)</b>	16.10	14.66
<b>Masse de l'échan humide m=m2 – m1 (g)</b>	28.2	26.7
<b>Masse de l'échan sec mw= m2-m3</b>	23.4	22.1
<b>Masse de l'eau(g)</b>	48	45
<b>Teneur en eau(%)</b>	20.51	20.8
<b>Moyenne(%)</b>	20.6	
<b>Wp</b>	21	

L'indice de plasticité :  $I_p = W_L - W_P = 8$





**Figure3.11:** Limite d'Atterberge sol+12% Marbre



Tableau3.25: limite de liquidité pour sol +15% Marbre

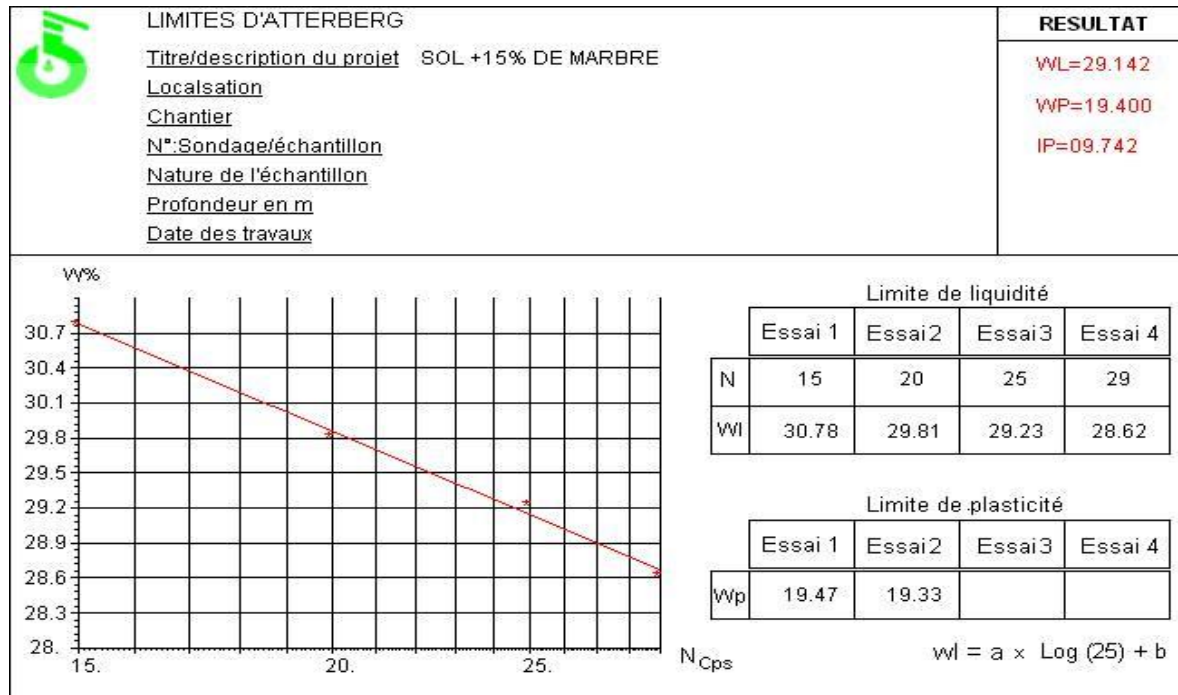
N° essai	Essai 1		Essai 2		Essai 3		Essai 4	
Nombre de coups	15		20		25		29	
N° de la tare	CI	AK	C1	AS	01	C2	VF	SR
Masse de l'ensemble (échan humide +Tare) m2(g)	24.91	24.08	23.71	25.29	21.33	21.59	22.37	22.90
Tare m1(g)	16.40	15.55	15.25	16.81	15.84	16.07	16.88	17.38
Masse de l'échan humide m=m2 – m1 (g)	8.51	8.53	8.46	8.48	5.49	5.52	5.49	5.52
Masse de l'échan sec mw= m2-m3	6.51	6.52	6.52	6.53	4.25	4.27	4.27	4.29
Masse de l'eau(g)	2.00	2.01	1.94	1.95	1.24	1.25	1.22	1.23
Teneur en eau(%)	30.72	30.82	29.75	29.86	29.17	29.27	28.6	28.69
Moyenne(%)	30.8		29.8		29.2		28.6	
Wl	29							

Tableau 3.26 : limite de plasticité sol +15% Marbre.

Essai limite de plasticité		
N° de la tare	VS	ABI
Masse de l'ensemble (échan humide +Tare) m2	18.85	18.75
Tare m1(g)	17.50	16.96
Masse de l'échan humide m=m2 – m1 (g)	13.5	17.9
Masse de l'échan sec mw= m2-m3	1.13	1.50
Masse de l'eau(g)	2.2	2.9
Teneur en eau(%)	19.46	19.33
Moyenne(%)	19.4	
Wp	20	

L'indice de plasticité :  $I_p = W_L - W_P = 9$





**Figure3.12:** Limite d'Atterberge sol+15% Marbre



**Tableau3.27:** limite de liquidité pour sol +18% Marbre

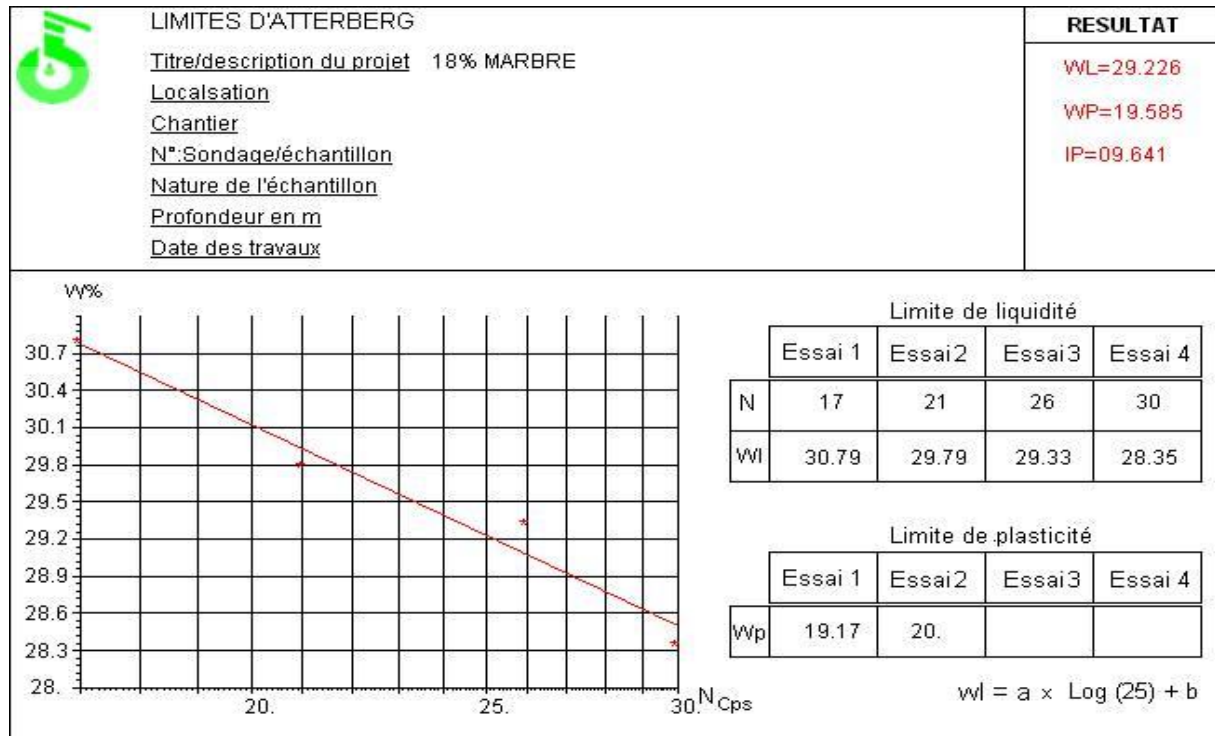
N° essai	Essai 1		Essai 2		Essai 3		Essai 4	
Nombre de coups	17		21		26		30	
N° de la tare	XG	SR	VC	SA	VD	MX	VM	CP
Masse de l'ensemble (échan humide +Tare) m2(g)	23.12	23.91	25.35	24.94	25.68	22.78	24.22	22.64
Tare m1(g)	16.61	17.38	18.15	17.72	17.10	17.17	16.16	16.89
Masse de l'échan humide m=m2 – m1 (g)	6.51	6.53	7.20	7.22	8.58	5.61	8.06	5.75
Masse de l'échan sec mw= m2-m3	4.98	4.99	5.55	5.56	6.60	4.36	6.28	4.48
Masse de l'eau(g)	1.53	1.54	1.65	1.66	1.98	1.25	1.78	1.27
Teneur en eau(%)	30.72	30.86	29.72	29.85	30	28.66	28.34	28.34
Moyenne(%)	30.8		29.8		29.3		28.4	
WI	30							

**Tableau 3.28 :** limite de plasticité sol +18% Marbre

Essai limite de plasticité		
<b>N° de la tare</b>	XI	AV
<b>Masse de l'ensemble (échan humide +Tare) m2</b>	20.85	24.56
<b>Tare m1(g)</b>	17.99	21.68
<b>Masse de l'échan humide m=m2 – m1 (g)</b>	2.86	2.88
<b>Masse de l'échan sec mw= m2-m3</b>	2.40	2.40
<b>Masse de l'eau(g)</b>	0.46	0.48
<b>Teneur en eau(%)</b>	19.16	20
<b>Moyenne(%)</b>	19.6	
<b>Wp</b>	20	

L'indice de plasticité :  $I_p = W_L - W_P = 10$





**Figure 3.13:** Limite d'Atterberge sol+18% Marbre



**Tableau3.29:** limite de liquidité pour sol +21% Marbre

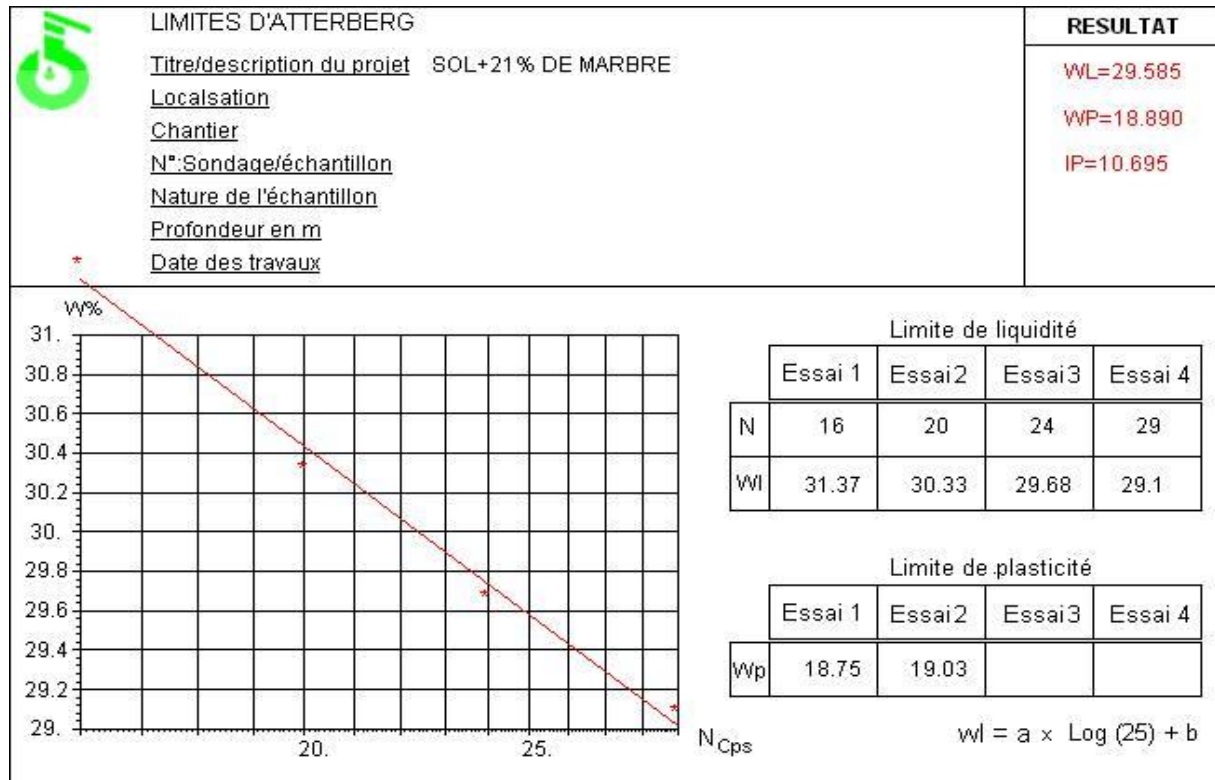
N° essai	Essai 1		Essai 2		Essai 3		Essai 4	
Nombre de coups	16		20		24		29	
N° de la tare	HK	MD	HO	SV	AN	XZ	VI	SA
Masse de l'ensemble (échan humide +Tare) m2(g)	22.93	23.76	32.47	27.22	20.72	21.97	22.33	29.28
Tare m1(g)	16.49	17.26	21.93	16.66	17.68	17.16	17.86	17.72
Masse de l'échan humide m=m2 – m1 (g)	6.44	6.50	10.54	10.56	3.04	4.81	4.47	11.56
Masse de l'échan sec mw= m2-m3	4.90	4.95	8.09	8.10	2.35	3.70	3.46	8.96
Masse de l'eau(g)	1.54	1.55	2.45	2.46	6.9	1.11	1.01	2.60
Teneur en eau(%)	31.42	31.3	30.28	30.37	29.36	30	29.19	29.01
Moyenne(%)	31.3		30.3		29.7		29.1	
Wl	30							

**Tableau 3.30 :** limite de plasticité sol +21% Marbre

Essai limite de plasticité		
<b>N° de la tare</b>	CZ	3
<b>Masse de l'ensemble (échan humide +Tare) m2</b>	18.76	20.52
<b>Tare m1(g)</b>	16.10	17.83
<b>Masse de l'échan humide m=m2 – m1 (g)</b>	2.66	2.69
<b>Masse de l'échan sec mw= m2-m3</b>	2.24	2.26
<b>Masse de l'eau(g)</b>	0.42	0.43
<b>Teneur en eau(%)</b>	18.75	19.02
<b>Moyenne(%)</b>	18.9	
<b>Wp</b>	18.9	

L'indice de plasticité :  $I_p = W_L - W_P = 11$





**Figure3.14:** Limite d'Atterberge sol+21% Marbre



**Tableau3.31:** limite de liquidité pour sol +24% Marbre

N° essai	Essai 1		Essai 2		Essai 3		Essai 4	
Nombre de coups	16		20		26		30	
N° de la tare	HK	SV	AN	VI	AK	CI	SZ	SA
Masse de l'ensemble (échan humide +Tare) m2(g)	23.55	23.97	23.60	23.80	26.46	21.61	27.78	29.47
Tare m1(g)	16.49	16.66	17.68	17.86	15.55	16.40	16.08	17.72
Masse de l'échan humide m=m2 – m1 (g)	7.06	7.31	5.92	5.94	10.91	5.21	11.70	11.75
Masse de l'échan sec mw= m2-m3	5.37	5.56	4.54	4.55	8.41	4.01	9.07	9.11
Masse de l'eau(g)	1.69	1.75	1.38	1.39	2.50	1.20	2.63	2.64
Teneur en eau(%)	31.47	31.47	30.4	30.54	29.72	29.95	29	28.97
Moyenne(%)	31.5		30.5		29.8		29	
Wl	30							

**Tableau 3.32 :** limite de plasticité sol +24% Marbre

Essai limite de plasticité		
N° de la tare	HO	MD
<b>Masse de l'ensemble (échan humide +Tare) m2</b>	23.87	19.23
<b>Tare m1(g)</b>	21.93	17.26
<b>Masse de l'échan humide m=m2 – m1 (g)</b>	1.94	1.97
<b>Masse de l'échan sec mw= m2-m3</b>	1.65	1.67
<b>Masse de l'eau(g)</b>	0.29	0.30
<b>Teneur en eau(%)</b>	17.57	17.96
<b>Moyenne(%)</b>	17.8	
<b>Wp</b>	18	

L'indice de plasticité :  $I_p = W_L - W_P = 12$



**Tableau3.33:** limite de liquidité pour sol +27% Marbre

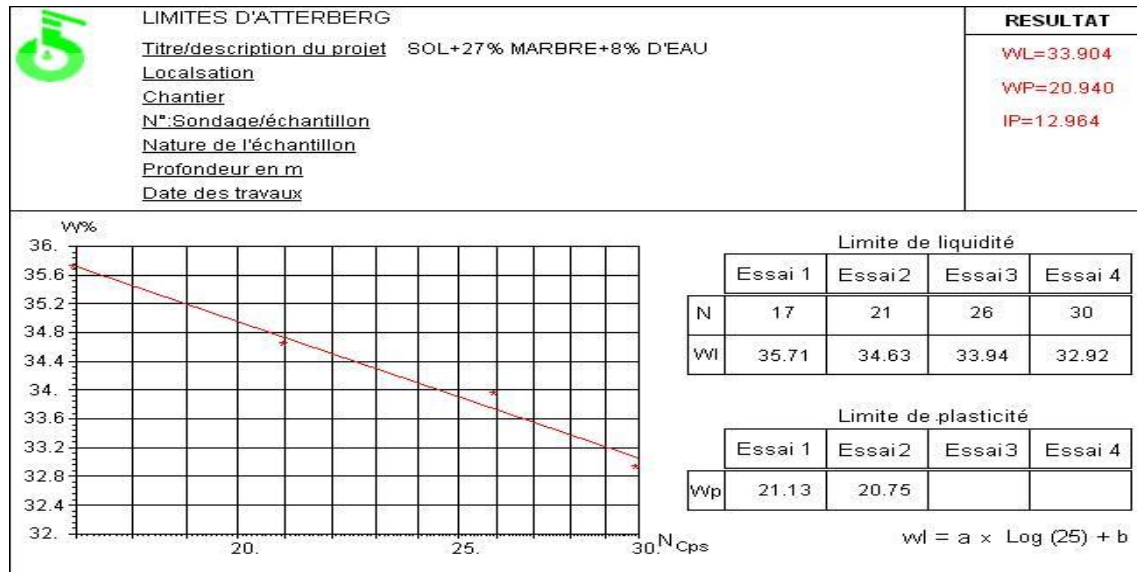
Nombre de coups	17		21		26		30	
N° de la tare	BB	VS	VC	CI	BT	XA	BY	SR
Masse de l'ensemble (échan humide +Tare) m2(g)	23.09	23.47	24.06	22.27	22.67	22.74	22.64	23.28
Tare m1(g)	17.09	17.50	18.15	16.40	16.83	16.86	16.79	17.38
Masse de l'échan humide m=m2 – m1 (g)	6.00	5.97	5.91	5.87	5.84	5.88	5.85	5.90
Masse de l'échan sec mw= m2-m3	4.42	4.40	4.39	4.36	4.36	4.39	4.40	4.44
Masse de l'eau(g)	1.58	1.57	1.52	1.51	1.48	1.49	1.45	1.46
Teneur en eau(%)	35.74	35.68	34.6	34.6	33.9	33.9	32.9	32.88
Moyenne(%)	35.7		34.6		33.9		32.9	
Wl	34							

**Tableau3.34:** limite de plasticité pour sol +27% Marbre.

Essai limite de plasticité		
N° de la tare	SA	MD
Masse de l'ensemble (échan humide +Tare) m2	19.44	19.18
Tare m1(g)	17.72	17.26
Masse de l'échan humide m=m2 – m1 (g)	1.72	1.92
Masse de l'échan sec mw= m2-m3	1.42	1.59
Masse de l'eau(g)	0.30	.033
Teneur en eau(%)	21.12	20.75
Moyenne(%)	20.9	
Wp	21	

L'indice de plasticité :  $I_p = W_L - W_P = 13$





**Figure 3.16:** Limite d'Atterberge sol+27% Marbre



**Tableau3.35:** limite de liquidité pour sol +30% Marbre

Nombre de coups	17		21		26		30	
N° de la tare	BB	VS	VC	CI	BT	XA	BY	SR
Masse de l'ensemble (échan humide +Tare) m2(g)	23.09	23.47	24.06	22.27	22.67	22.74	22.64	23.28
Tare m1(g)	17.09	17.50	18.15	16.40	16.83	16.86	16.79	17.38
Masse de l'échan humide m=m2 – m1 (g)	6.00	5.97	5.91	5.87	5.84	5.88	5.85	5.90
Masse de l'échan sec mw= m2-m3	4.42	4.40	4.39	4.36	4.36	4.39	4.40	4.44
Masse de l'eau(g)	1.58	1.57	1.52	1.51	1.48	1.49	1.45	1.46
Teneur en eau(%)	35.74	35.68	34.6	34.6	33.9	33.9	32.9	32.88
Moyenne(%)	35.7		34.6		33.9		32.9	
Wl	34							

**Tableau3.36:** limite de plasticité pour sol +30% Marbre

<b>Essai limite de plasticité</b>		
<b>N° de la tare</b>	<b>SA</b>	<b>MD</b>
<b>Masse de l'ensemble (échan humide +Tare) m2</b>	19.44	19.18
<b>Tare m1(g)</b>	17.72	17.26
<b>Masse de l'échan humide m=m2 – m1 (g)</b>	1.72	1.92
<b>Masse de l'échan sec mw= m2-m3</b>	1.42	1.59
<b>Masse de l'eau(g)</b>	0.30	.033
<b>Teneur en eau(%)</b>	21.12	20.75
<b>Moyenne(%)</b>	20.9	
<b>Wp</b>	21	

L'indice de plasticité :  $I_p = W_L - W_P = 13$



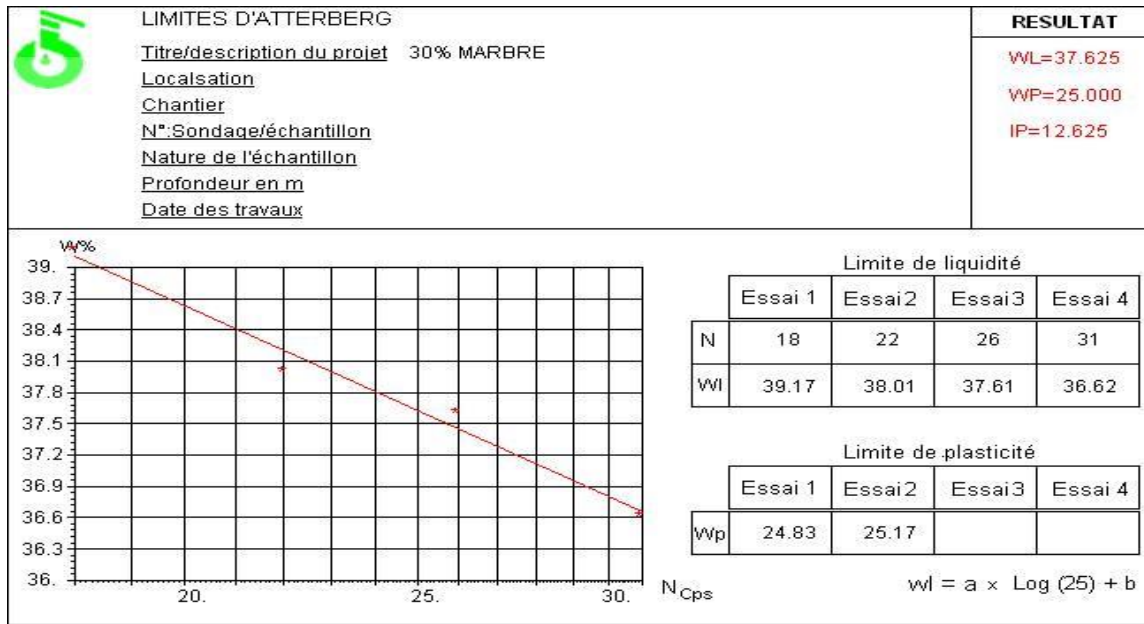


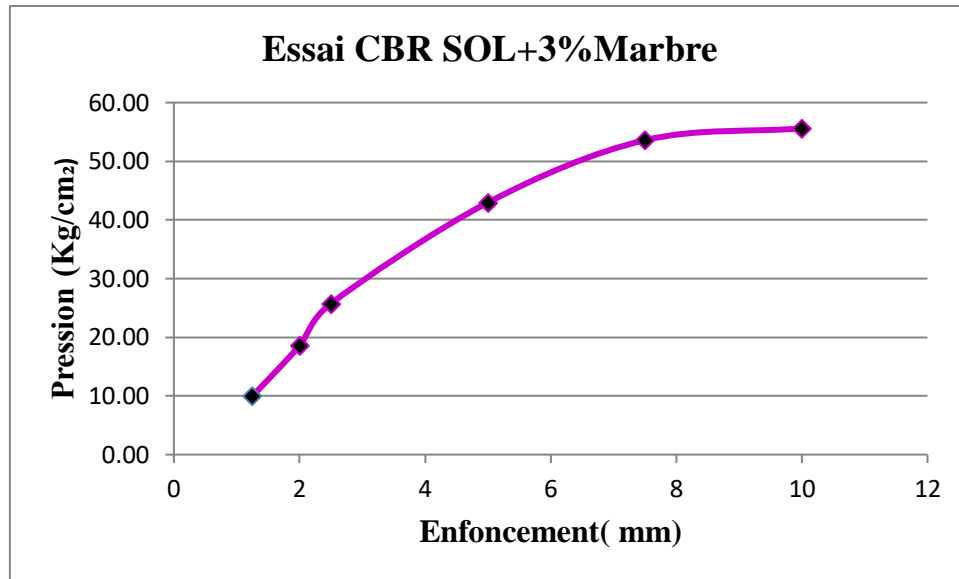
Figure 3.17: Limite d'Atterberge sol+30% Marbre

### 3.2 Essai de CBR:

Tableau 3.38 : Les résultats de l'essai de CBR Sol + 3% marbre

Temps (min)	Enfoncement (mm)	Force totale		Pression(kg/cm2)	Calcul de l'indice portant	
		Lecture	Valeur			
1	1,25	1,93	193	9,95	<b>I.P. à 2.5 = 100. F</b>	37,38
1.5	2	3,6	360	18,57	<b>2.5/13,35</b>	
2	2,5	4,99	499	25,73	<b>I.P. à 5.0 = 100. F</b>	41,80
4	5	8,33	833	42,96	<b>5.0/19.93</b>	
6	7,5	10,39	1039	53,58	<b>L'indice Portant</b>	41,80
8	10	10,78	1078	55,60	<b>Immédiat / CBR</b>	

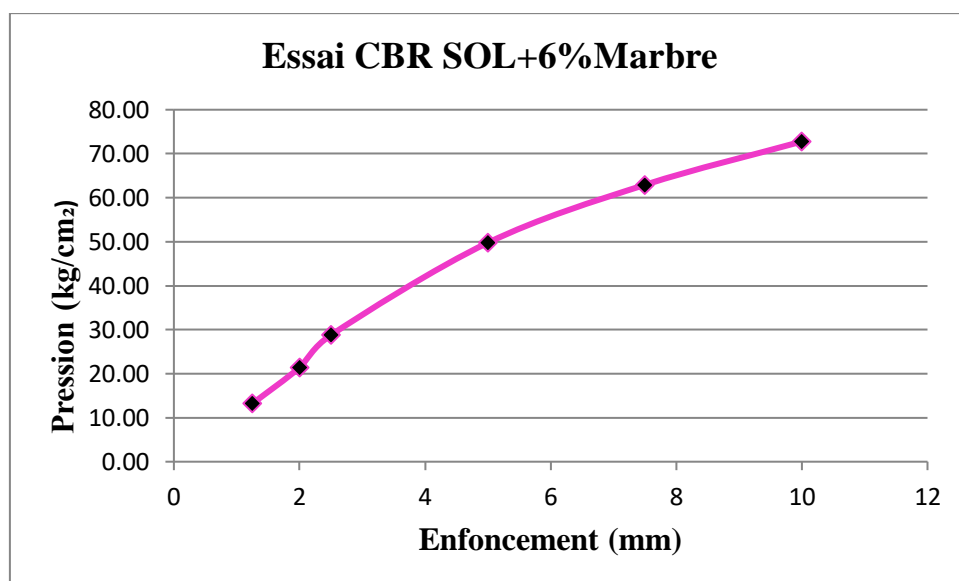




**Figure 3.18 :** Essais de CBR d'un sol avec 3% de marbre.

**Tableau 3.39 :** Les résultats de l'essai de CBR Sol + 6% marbre

Temps (min)	Enfoncement (mm)	Force totale		Pression(kg/cm2)	Calcul de l'indice portant	
		Lecture	Valeur			
1	1,25	2,56	256	13,20	I.P. à 2.5 = 100. F	41,80
1.5	2	4,15	415	21,40	2.5/13,35	
2	2,5	5,58	558	28,78	I.P. à 5.0 = 100. F	48,42
4	5	9,65	965	49,77	5.0/19.93	
6	7,5	12,2	1220	62,92	L'indice Portant	48,42
8	10	14,11	1411	72,77	Immédiat / CBR	

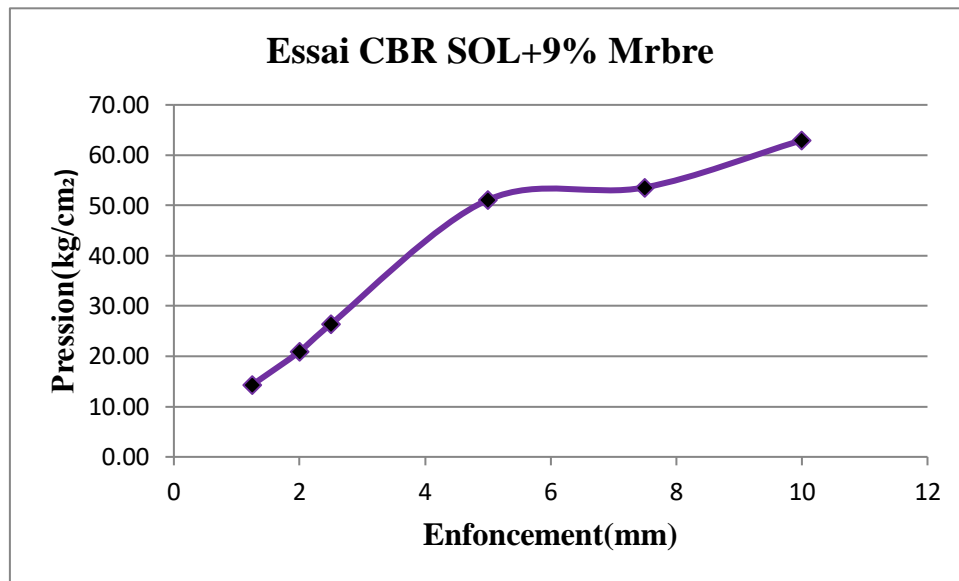


**Figure 3.19 :** Essais de CBR d'un sol avec 6% de marbre.



**Tableau3.40 :** Les résultats de l'essai de CBR Sol + 9% marbre

Temps (min)	Enfoncement (mm)	Force totale		Pression(kg/cm2)	Calcul de l'indice portant	
		Lecture	Valeur			
<b>1</b>	1,25	2,78	278	14,34	<b>I.P. à 2.5 = 100. F</b>	38,35
<b>1.5</b>	2	4,06	406	20,94	<b>2.5/13,35</b>	
<b>2</b>	2,5	5,12	512	26,41	<b>I.P. à 5.0 = 100. F</b>	49,72
<b>4</b>	5	9,91	991	51,11	<b>5.0/19.93</b>	
<b>6</b>	7,5	10,39	1039	53,58	<b>L'indice Portant</b>	49,72
<b>8</b>	10	12,21	1221	62,97	<b>Immédiat / CBR</b>	

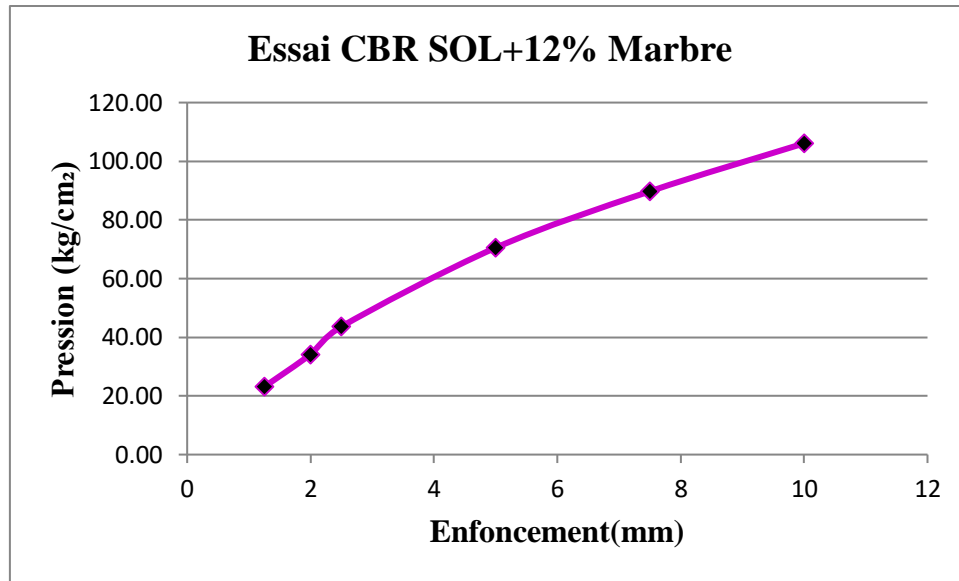


**Figure 3.20 :** Essais de CBR d'un sol avec 9% de marbre.

**Tableau3.41:** Les résultats de l'essai de CBR Sol + 12% marbre

Temps (min)	Enfoncement (mm)	Force totale		Pression(kg/cm2)	Calcul de l'indice portant	
		Lecture	Valeur			
<b>1</b>	1,25	4,48	448	23,10	<b>I.P. à 2.5 = 100. F</b>	63,37
<b>1.5</b>	2	6,63	663	34,19	<b>2.5/13,35</b>	
<b>2</b>	2,5	8,46	846	43,63	<b>I.P. à 5.0 = 100. F</b>	68,59
<b>4</b>	5	13,67	1367	70,50	<b>5.0/19.93</b>	
<b>6</b>	7,5	17,4	1740	89,74	<b>L'indice Portant</b>	68,59
<b>8</b>	10	20,57	2057	106,09	<b>Immédiat / CBR</b>	

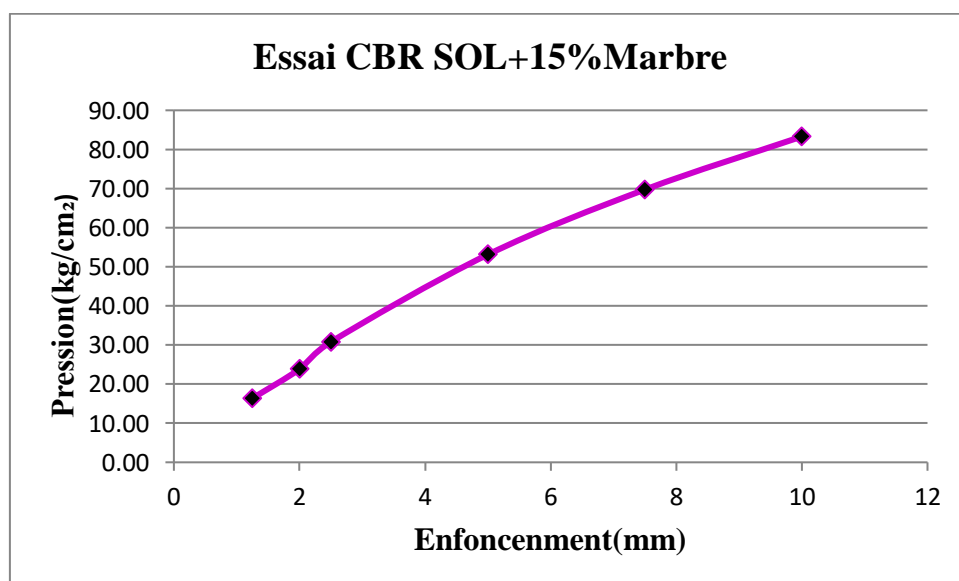




**Figure 3.21 :** Essais de CBR d'un sol avec 12% de marbre.

**Tableau3.42:** Les résultats de l'essai de CBR Sol + 15% marbre

Temps (min)	Enfoncement (mm)	Force totale		Pression(kg/cm2)	Calcul de l'indice portant	
		Lecture	Valeur			
1	1,25	3,17	317	16,35	<b>I.P. à 2.5 = 100. F</b>	44,72
1.5	2	4,62	462	23,83	<b>2.5/13,35</b>	
2	2,5	5,97	597	30,79	<b>I.P. à 5.0 = 100. F</b>	51,68
4	5	10,3	1030	53,12	<b>5.0/19.93</b>	
6	7,5	13,52	1352	69,73	<b>L'indice Portant</b>	51,68
8	10	16,15	1615	83,29	<b>Immédiat / CBR</b>	

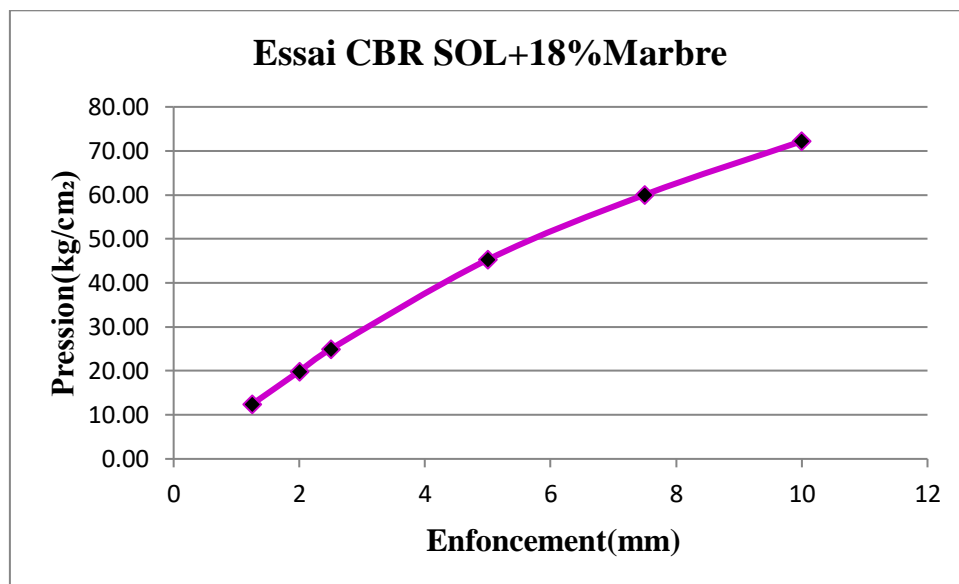


**Figure 3.22:** Essais de CBR d'un sol avec 15% de marbre.



**Tableau3.43:** Les résultats de l'essai de CBR Sol + 18% marbre

Temps (min)	Enfoncement (mm)	Force totale		Pression(kg/cm <sup>2</sup> )	Calcul de l'indice portant	
		Lecture	Valeur			
1	1,25	2,41	241	12,43	I.P. à 2.5 = 100. F	36,25
1.5	2	3,86	386	19,91	2.5/13,35	
2	2,5	4,84	484	24,96	I.P. à 5.0 = 100. F	44,05
4	5	8,78	878	45,28	5.0/19.93	
6	7,5	11,64	1164	60,03	L'indice Portant	44,05
8	10	14	1400	72,20	Immédiat / CBR	

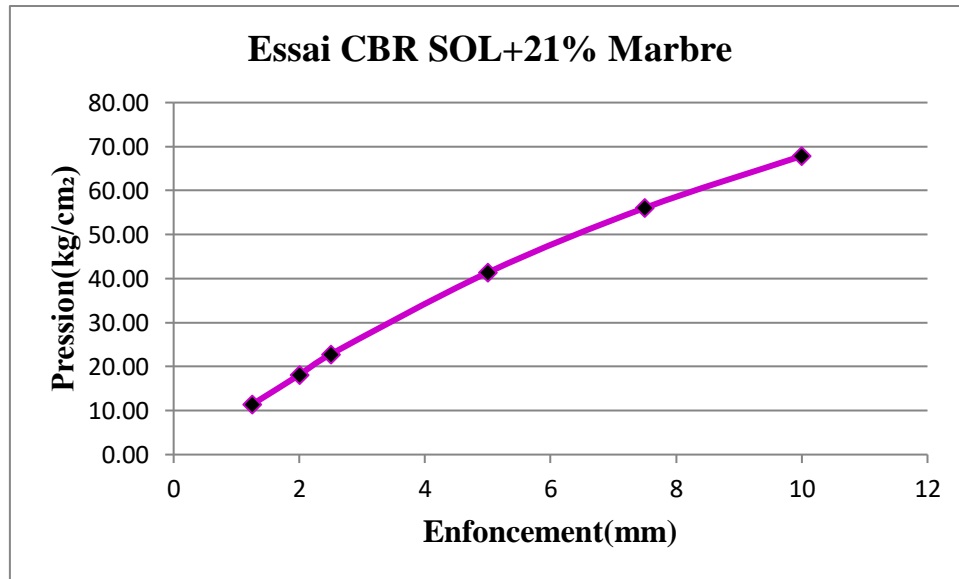


**Figure 3.23 :** Essais de CBR d'un sol avec 18% de marbre.

**Tableau3.44:** Les résultats de l'essai de CBR Sol + 21% marbre

Temps (min)	Enfoncement (mm)	Force totale		Pression(kg/cm <sup>2</sup> )	Calcul de l'indice portant	
		Lecture	Valeur			
1	1,25	2,21	221	11,40	I.P. à 2.5 = 100. F	33,11
1.5	2	3,51	351	18,10	2.5/13,35	
2	2,5	4,42	442	22,80	I.P. à 5.0 = 100. F	40,24
4	5	8,02	802	41,36	5.0/19.93	
6	7,5	10,87	1087	56,06	L'indice Portant	40,24
8	10	13,16	1316	67,87	Immédiat / CBR	

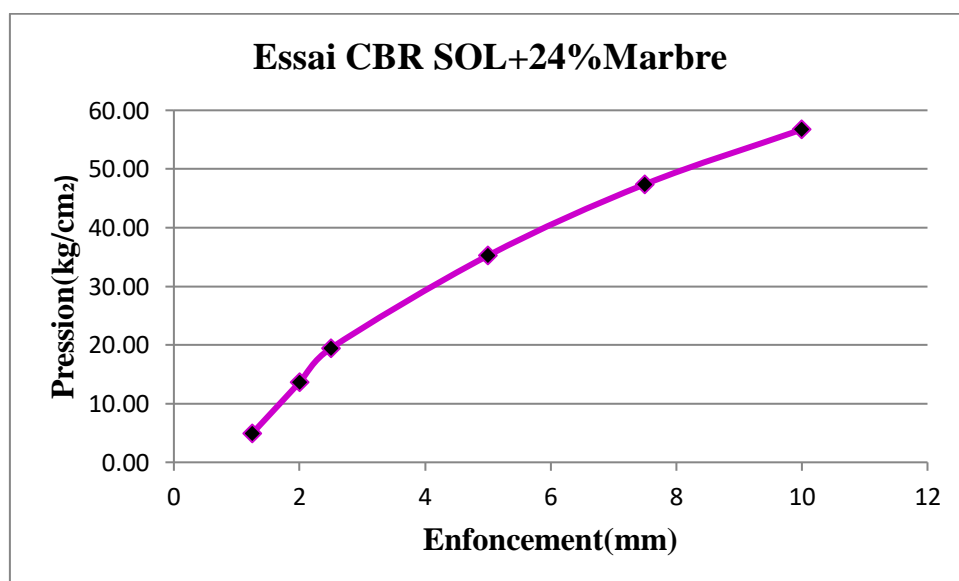




**Figure 3.24:** Essais de CBR d'un sol avec 21% de marbre.

**Tableau3.45:** Les résultats de l'essai de CBR Sol + 24% marbre

Temps (min)	Enfoncement (mm)	Force totale		Pression(kg/cm2)	Calcul de l'indice portant	
		Lecture	Valeur			
1	1,25	0,96	96	4,95	I.P. à 2.5 = 100. F	28
1.5	2	2,64	264	13,62	2.5/13,35	
2	2,5	3,77	377	19,44	I.P. à 5.0 = 100. F	34,27
4	5	6,83	683	35,22	5.0/19.93	
6	7,5	9,19	919	47,40	L'indice Portant	34,27
8	10	11	1100	56,73	Immédiat / CBR	

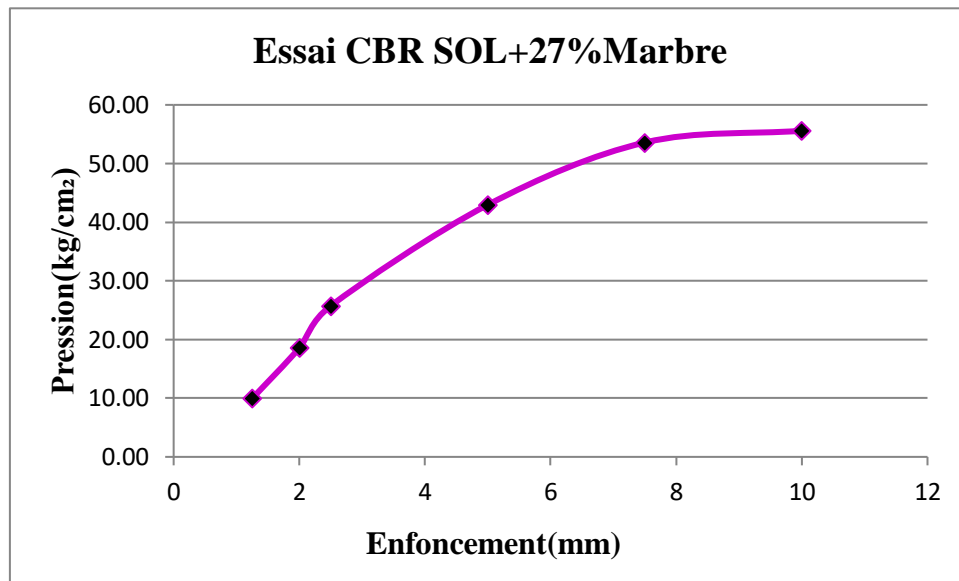


**Figure 3.25:** Essais de CBR d'un sol avec 24% de marbre.



**Tableau3.46:** Les résultats de l'essai de CBR Sol + 27% marbre

Temps (min)	Enfoncement (mm)	Force totale		Pression(kg/cm <sup>2</sup> )	Calcul de l'indice portant	
		Lecture	Valeur			
1	1,25	1,35	135	6,96	I.P. à 2.5 = 100. F	21,72
1.5	2	2,75	275	14,18	2.5/13,35	
2	2,5	2,9	290	14,96	I.P. à 5.0 = 100. F	21,73
4	5	4,33	433	22,33	5.0/19.93	
6	7,5	7,7	770	39,71	L'indice Portant	21,73
8	10	8,68	868	44,77	Immédiat / CBR	

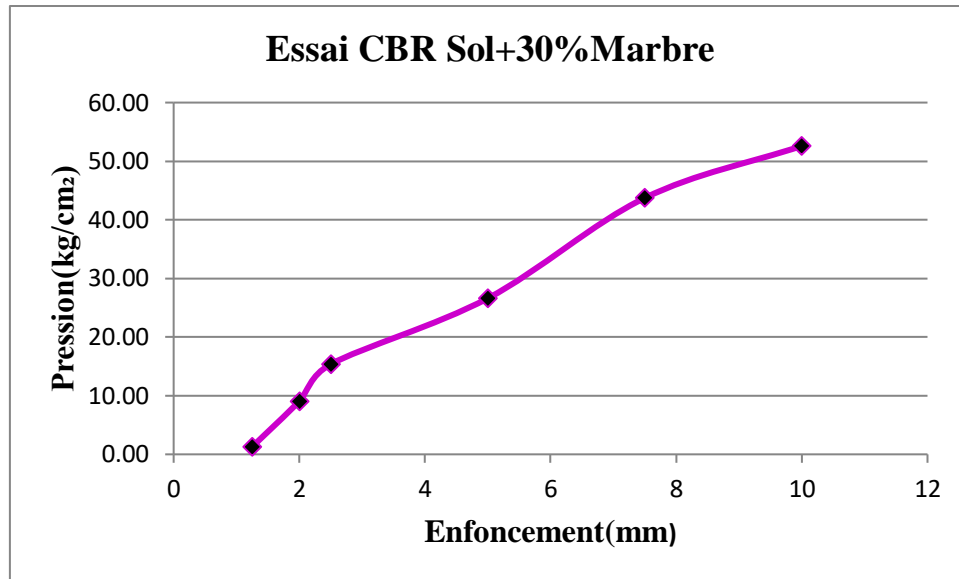


**Figure3.26:** Essais de CBR d'un sol avec 27% de marbre.

**Tableau3.47:** Les résultats de l'essai de CBR Sol + 30% marbre

Temps (min)	Enfoncement (mm)	Force totale		Pression(kg/cm <sup>2</sup> )	Calcul de l'indice portant	
		Lecture	Valeur			
1	1,25	0,25	25	1,29	I.P. à 2.5 = 100. F	22,32
1.5	2	1,76	176	9,08	2.5/13,35	
2	2,5	2,98	298	15,37	I.P. à 5.0 = 100. F	25,89
4	5	5,16	516	26,61	5.0/19.93	
6	7,5	8,48	848	43,73	L'indice Portant	25,89
8	10	10,2	1020	52,60	Immédiat / CBR	





**Figure3.27:** Essais de CBR d'un sol avec 30% de marbre



A decorative border resembling a scroll, with a vertical strip on the left and a horizontal strip at the top, both featuring a rolled-up end.

# Chapitre 4

Interprétation et  
comparaison des résultats



## 1. Introduction

Dans ce dernier chapitre nous allons interpréter et comparer les résultats qui ont déjà été discuté dans le chapitre précédent pour voir le meilleur résultat désiré selon de différents essais et avec variation des additions et leurs pourcentages.

## 2. Essai Proctor

Le Proctor a pour but de déterminer la densité maximale atteinte pour une énergie de compactage donnée, ainsi que la teneur en eau optimale correspondante pour un sol de remblaidonné et des conditions de compactage fixées.

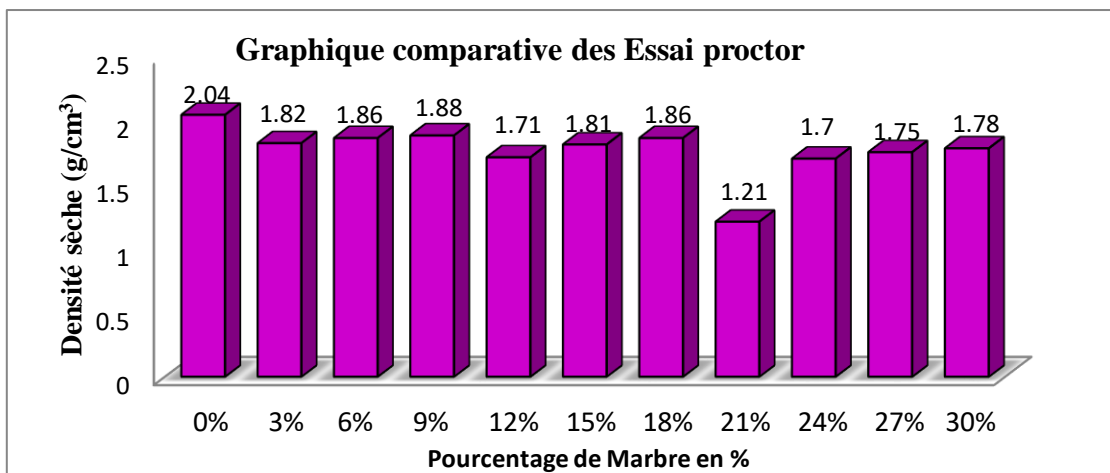
**Tableau.4.1 :** Variation de la masse volumique sèche en fonction des pourcentages de Marbre

Marbre %	0%	3%	6%	9%	12%	15%	18%
W (%)	8%	10%	10%	10%	12%	14%	10%
$\gamma_{op}(g/cm^3)$	2,04	1,95	1,9	1,9	1,9	1,9	1,88

Nous avons pris l'optimum du sol naturel qui égale à 8% d'eau et nous avons obtenu les résultats dans le tableau suivant :

**Tableau.4.2. :** Les résultats des paramètres de l'essai Proctor la masse sèche en fonction de Marbre.

Marbre%	Sol Naturel	3%	6%	9%	12%	15%	18%	21%	24%	27%	30%
$\gamma_d(8\%d'eau)$	2,04	1,82	1,86	1,88	1,71	1,81	1,86	1,21	1,7	1,75	1,78



**Figure.4.1.** Graphique comparative des essais Proctor



### **Interprétation :**

D'après l'histogramme, une légère variation de la masse sèche, d'environ 8% à 16% ; une diminution de 40,68% pour 21% d'ajout.

La figure 4.2 donne l'évolution des masses volumiques sèches en fonction de le pourcentage de Marbre. On constate que la plus grande valeur de la masse volumique sèche maximale (2,04 g/cm<sup>3</sup>) est obtenue pour le sol sans traitement. Pour le sol traité par la poudre du marbre, la plus grande valeur de la masse volumique sèche maximale (1.88 g/cm<sup>3</sup>) est obtenue pour le sol traité à 9% de la poudre du marbre.

La tendance observée dans la présente étude concorde avec les observations de Muhammad Siyab Khana et all ,(2018) la densité sèche maximale du sol était passée de 2,399 g/cc à partir de 2,272 g/cc jusqu'à l'expansion de 12 % de poudre de verre. Alors qu'en cas d'OMC, le diagramme montre des variétés. L'OMC maximale obtenue à 0 % de poudre de verre et l'expansion de la poudre de verre diminue l'OMC.[17]

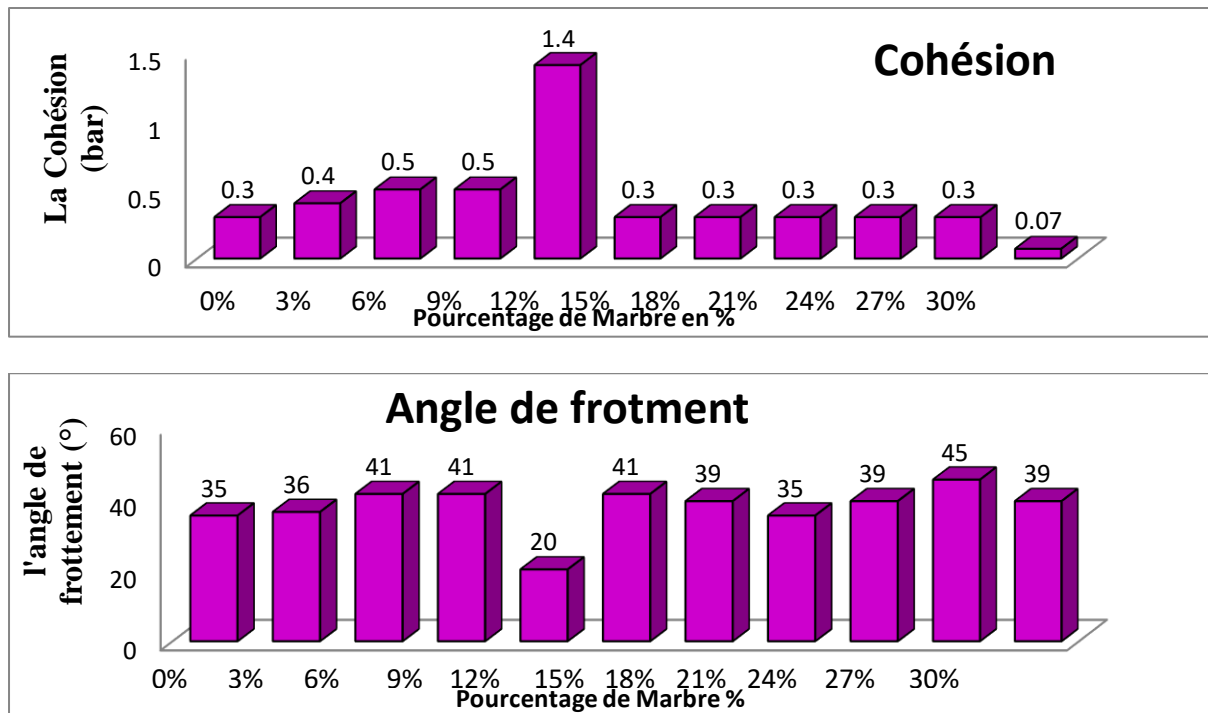
### **3.Essai Cisaillement**

L'objectif de ces essais est la détermination des paramètres de du cisaillement sol et qui sont : l'angle de frottement interne  $\phi$ , la cohésion C et la résistance au cisaillement.

**Tableau.4.3:**Les résultats des paramètres de l'essai cisaillement la cohésion et l'angle de frottement :

<b>Marbre%</b>	<b>Cohésion C (en bar)</b>	<b>Angle de frottement <math>\phi</math>(en °)</b>
<b>0%</b>	0,604	29,6
<b>3%</b>	0,445	42,66
<b>6%</b>	1	33,3
<b>9%</b>	1,506	40,5
<b>12%</b>	0,16	40,33
<b>15%</b>	0,75	33,75
<b>18%</b>	0,533	39
<b>21%</b>	0,978	28,74
<b>24%</b>	0,354	39
<b>27%</b>	0,232	43,33
<b>30%</b>	0,749	34





**Figure.4.2 :** Graphique comparative des essais de cisaillement.

#### Interprétation :

L'incorporation du déchet en poudre de marbre a fait une légère variation des caractéristiques de résistance au cisaillement on trouve que les résultats les plus élevés de la cohésion qui était égale 1.4 bar correspondants au sol + 12% marbre et diminution de l'angle de frottement qui égale 20° correspondants au sol + 12% marbre

Roaa M. Fadhil, Haifaa A. Ali ( 2019), Les résultats ont montré que la cohésion a légèrement augmenté à (2,5) kPa, tandis que l'angle de frottement interne a diminué à (28°).

### 4. Essai CBR

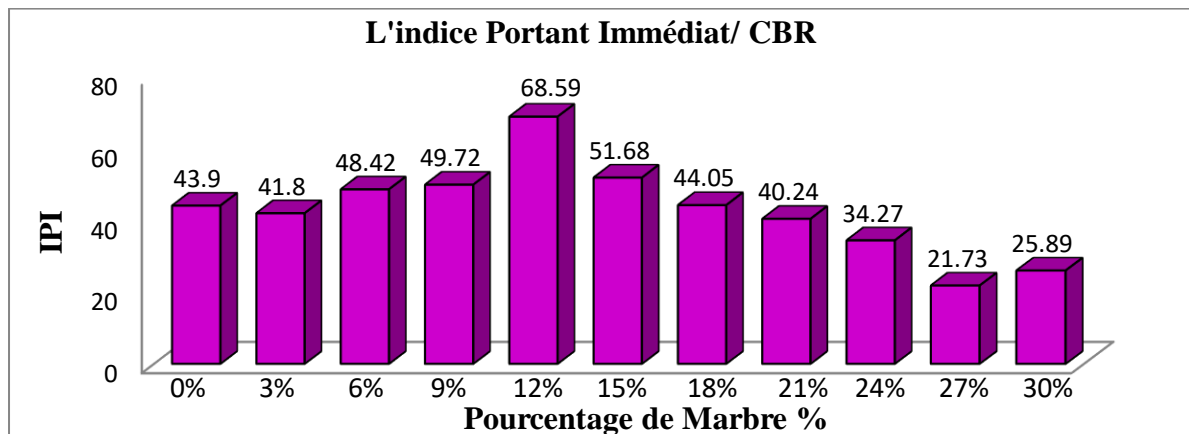
L'essai de compression simple se fait selon la norme NF EN 13286-41. Il consiste à soumettre l'éprouvette à une force axiale jusqu'à la rupture. La résistance à la compression simple  $R_c$  est définie comme la contrainte mesurée à la rupture.

#### 4.1 Essai CBR pour l'argile :



**Tableau 4.4 :** le tableau présente L'indice Portant CBR.

% de Marbre	L'indice Portant Immédiat/ CBR
0	43,9
3	41,8
6	48,42
9	49,72
12	68,59
15	51,68
18	44,05
21	40,24
24	34,27
27	21,73
30	25,89



**Figure.4.3.**Graphique comparative des essais CBR

#### Interprétation :

Le meilleur résultat de l'indice portant obtenu à partir de l'essai CBR réalisé sur le mélange Sol + 12% marbre qui donne IPI = 68,59 avec une augmentation IPI de 36% par rapport au sol naturel.

Syed Zishan Ashiq et all (2022) ses résultats montrent que la construction d'une route de 1 km de long avec un sous-sol modifié par la poudre de marbre est amélioré de 22 %.



## 4.2 Comportement sol granulaire

### Essai CBR pour le sable:

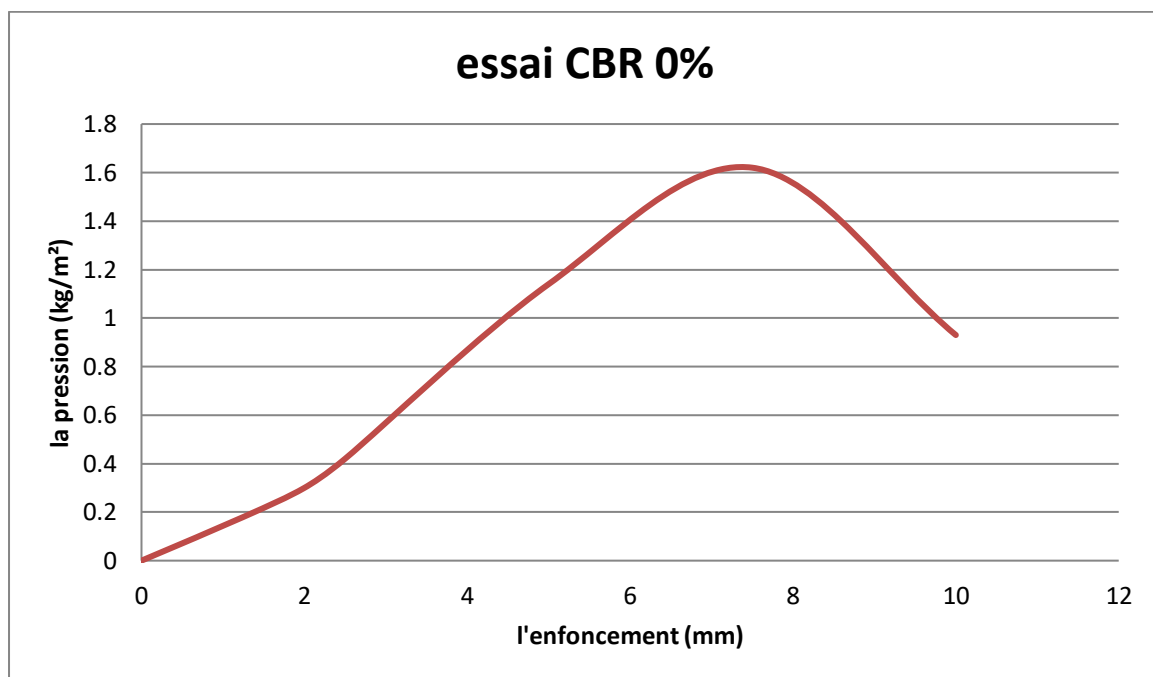
**Tableau 4.5:** Les résultats de l'essai de CBR Sable naturel.

**0% cendre biomasse :**

Densité sec  $\gamma_d = 1.55 \text{ g/cm}^3$   $W = 6\%$

Temps (min)	Enfoncement (mm)	Force total (kn)		Pression (kg/m <sup>2</sup> )	Calcul de l'indice de portance Ip
		Lecture	Valeur		
1	1.25	0.360	3.6	0.18	
1.5	2	0.601	6.01	0.30	
2	2.5	0.815	8.15	0.42	6,1
4	5	2.223	22.23	1.14	11.1
6	7.5	3.149	31.49	1.62	
8	10	2.816	18.16	0.93	

Indice de portance CBR max est 1.11.

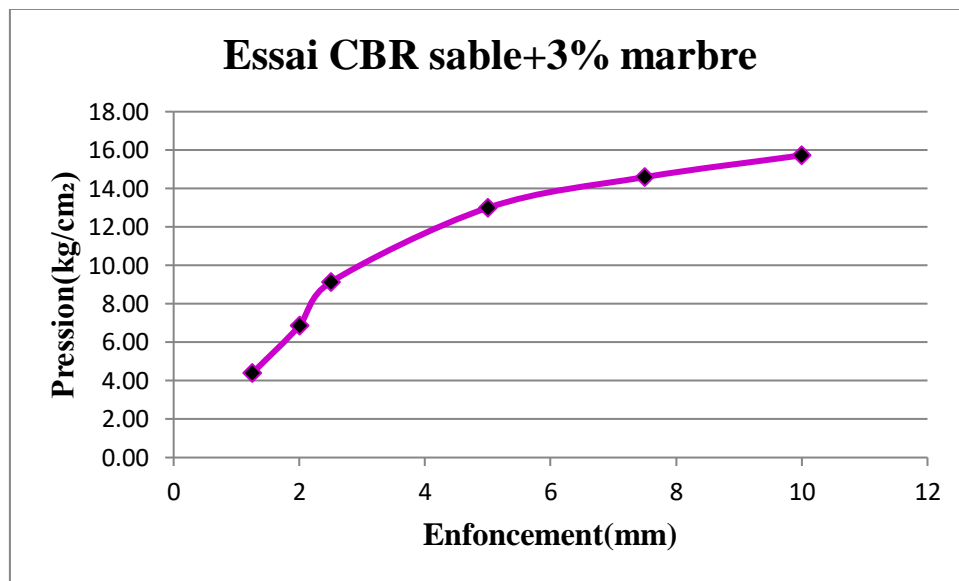


**Figure 4.5** Courbe essai CBR sable naturel



**Tableau 4.6:**Les résultats de l'essai de CBR (Sable + 3% Marbre)

Temps (min)	Enfoncement (mm)	Force totale		Pression(kg/cm <sup>2</sup> )	Calcul de l'indice portant	
		Lecture	Valeur			
1	1,25	0,85	85	4,38	I.P. à 2.5 = 100. F	13,26
1.5	2	1,33	133	6,86	2.5/13,35	
2	2,5	1,77	177	9,13	I.P. à 5.0 = 100. F	12,64
4	5	2,52	252	13,00	5.0/19.93	
6	7,5	2,83	283	14,60	L'indice Portant	13,26
8	10	3,05	305	15,73	Immédiat / CBR	

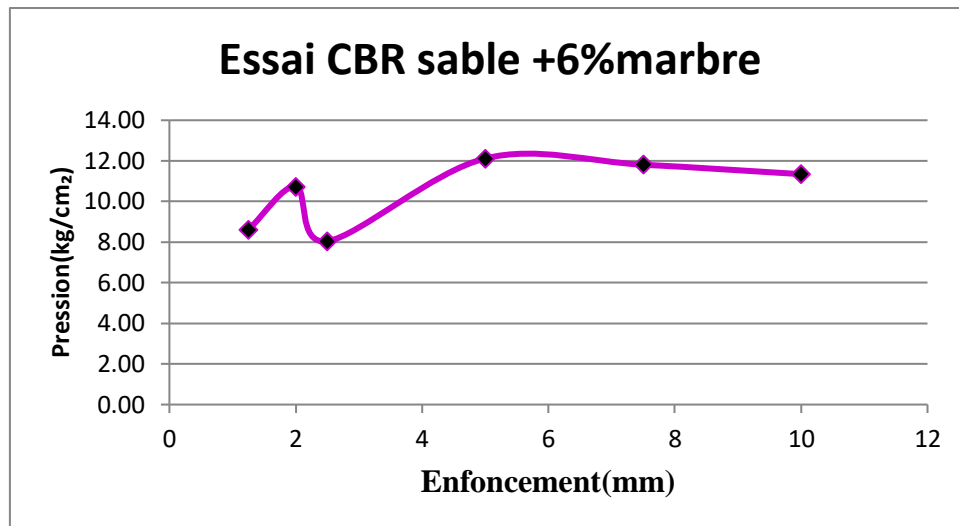


**Figure4.5** Courbe essai CBR sable+3% marbre

**Tableau 4.7:**Les résultats de l'essai de CBR (Sable + 6% Marbre)

Temps (min)	Enfoncement (mm)	Force totale		Pression(kg/cm <sup>2</sup> )	Calcul de l'indice portant	
		Lecture	Valeur			
1	1,25	1,67	167	8,61	I.P. à 2.5 = 100. F	11,69
1.5	2	2,08	208	10,73	2.5/13,35	
2	2,5	1,56	156	8,05	I.P. à 5.0 = 100. F	11,79
4	5	2,35	235	12,12	5.0/19.93	
6	7,5	2,29	229	11,81	L'indice Portant	11,79
8	10	2,2	220	11,35	Immédiat / CBR	

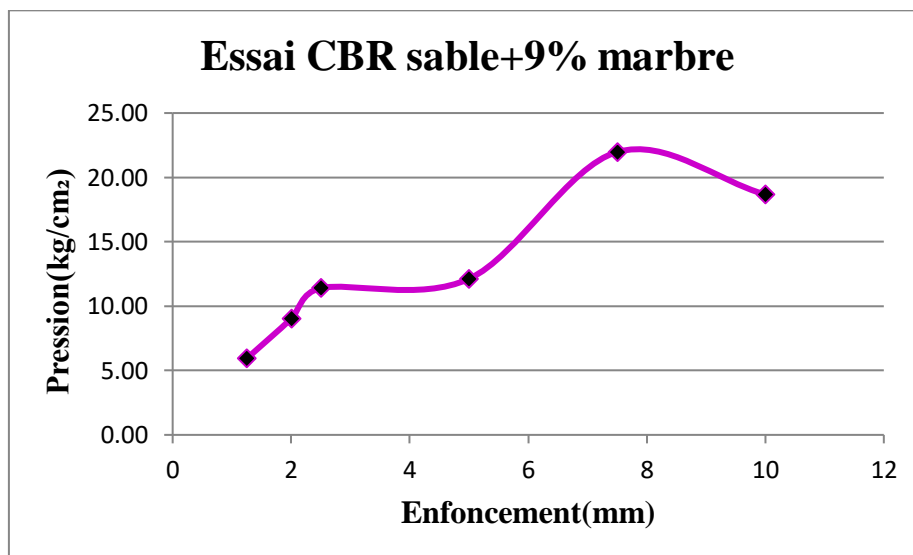




**Figure4.6** Courbe essai CBR sable+6% marbre

**Tableau 4.8:**Les résultats de l'essai de CBR (Sable + 9% Marbre)

Temps (min)	Enfoncement (mm)	Force totale		Pression(kg/cm2)	Calcul de l'indice portant	
		Lecture	Valeur			
1	1,25	1,15	115	5,93	<b>I.P. à 2.5 = 100. F</b>	16,55
1.5	2	1,75	175	9,03	<b>2.5/13,35</b>	
2	2,5	2,21	221	11,40	<b>I.P. à 5.0 = 100. F</b>	11,79
4	5	2,35	235	12,12	<b>5.0/19.93</b>	
6	7,5	4,26	426	21,97	<b>L'indice Portant</b>	16,55
8	10	3,62	362	18,67	<b>Immédiat / CBR</b>	

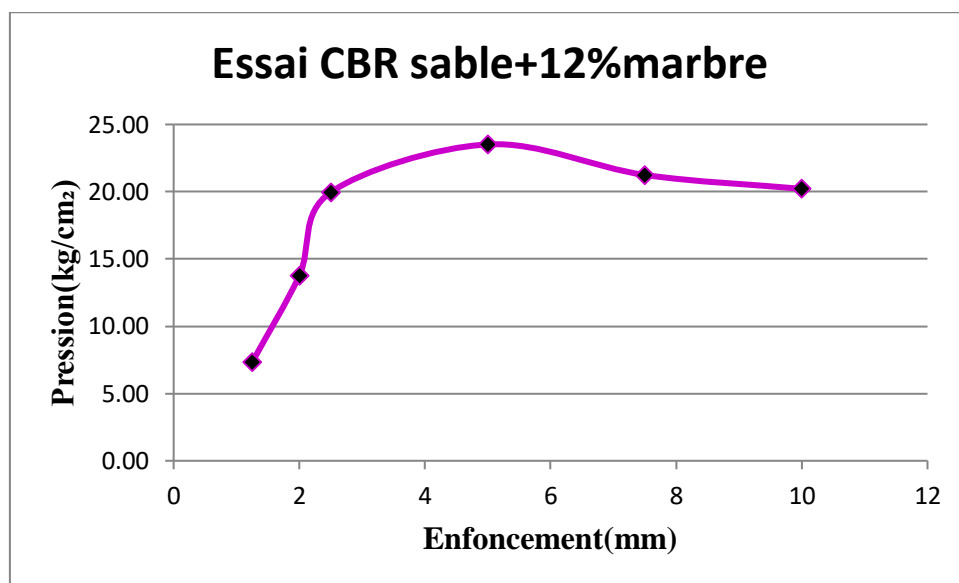


**Figure4.8** Courbe essai CBR sable+9% marbre



**Tableau 4.9:**Les résultats de l'essai de CBR (Sable + 12% Marbre)

Temps (min)	Enfoncement (mm)	Force totale		Pression(kg/cm <sup>2</sup> )	Calcul de l'indice portant	
		Lecture	Valeur			
1	1,25	1,42	142	7,32	I.P. à 2.5 = 100. F	28,99
1.5	2	2,67	267	13,77	2.5/13,35	
2	2,5	3,87	387	19,96	I.P. à 5.0 = 100. F	22,88
4	5	4,56	456	23,52	5.0/19.93	
6	7,5	4,12	412	21,25	L'indice Portant	28,99
8	10	3,92	392	20,22	Immédiat / CBR	

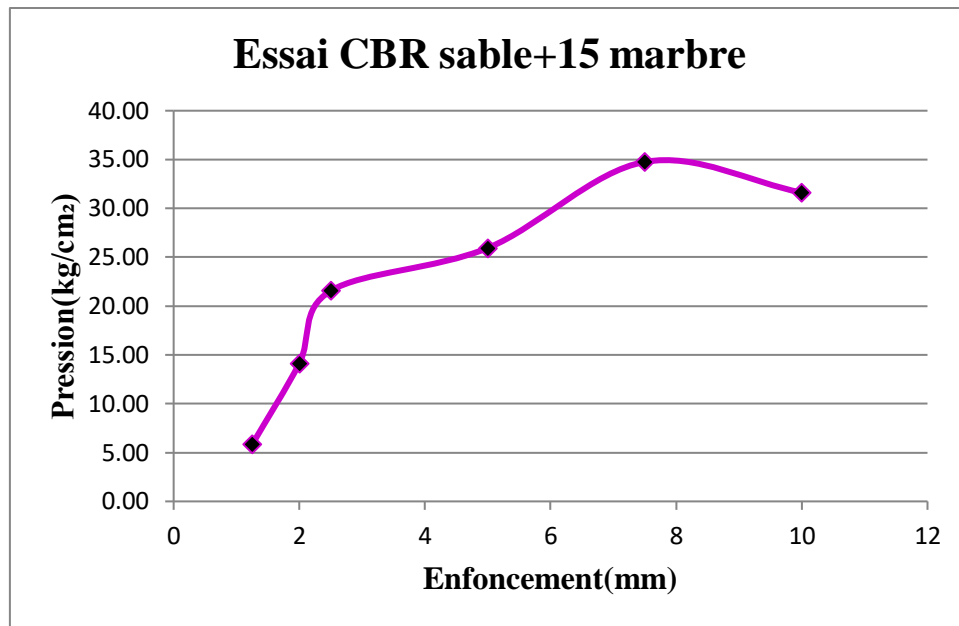


**Figure4.9** Courbe essai CBR sable+12% marbre

**Tableau 4.10:**Les résultats de l'essai de CBR (Sable + 15% Marbre)

Temps (min)	Enfoncement (mm)	Force totale		Pression(kg/cm <sup>2</sup> )	Calcul de l'indice portant	
		Lecture	Valeur			
1	1,25	1,13	113	5,83	I.P. à 2.5 = 100. F	31,31
1.5	2	2,74	274	14,13	2.5/13,35	
2	2,5	4,18	418	21,56	I.P. à 5.0 = 100. F	25,24
4	5	5,03	503	25,94	5.0/19.93	
6	7,5	6,74	674	34,76	L'indice Portant	31,31
8	10	6,13	613	31,61	Immédiat / CBR	



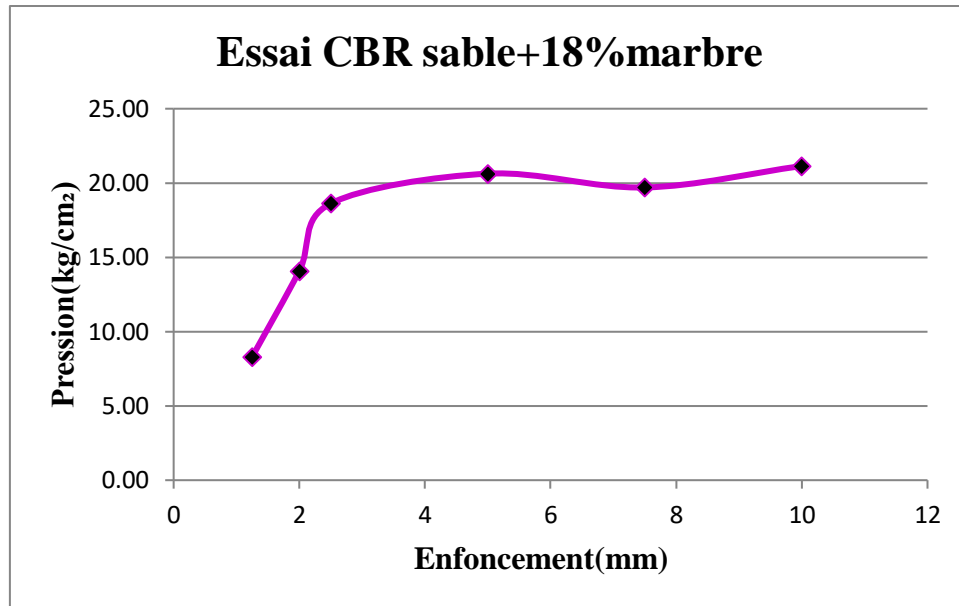


**Figure 4.10** Courbe essai CBR sable+15% marbre

**Tableau 4.11:** Les résultats de l'essai de CBR (Sable + 18% Marbre)

Temps (min)	Enfoncement (mm)	Force totale		Pression(kg/cm2)	Calcul de l'indice portant	
		Lecture	Valeur			
1	1,25	1,61	161	8,30	<b>I.P. à 2.5 = 100. F</b>	27,04
1.5	2	2,73	273	14,08	<b>2.5/13,35</b>	
2	2,5	3,61	361	18,62	<b>I.P. à 5.0 = 100. F</b>	20,07
4	5	4	400	20,63	<b>5.0/19.93</b>	
6	7,5	3,82	382	19,70	<b>L'indice Portant</b>	27,04
8	10	4,1	410	21,14	<b>Immédiat / CBR</b>	

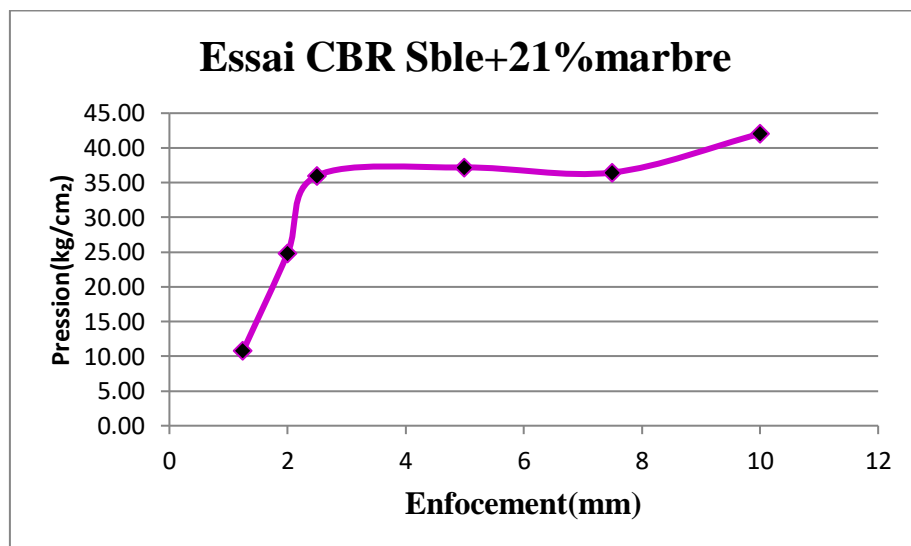




**Figure 4.11** Courbe essai CBR sable+18% marbre

**Tableau 4.11:** Les résultats de l'essai de CBR (Sable + 21% Marbre)

Temps (min)	Enfoncement (mm)	Force totale		Pression(kg/cm2)	Calcul de l'indice portant	
		Lecture	Valeur			
1	1,25	2,1	210	10,83	<b>I.P. à 2.5 = 100. F</b>	52,28
1.5	2	4,81	481	24,81		
2	2,5	6,98	698	36,00	<b>I.P. à 5.0 = 100. F</b>	36,18
4	5	7,21	721	37,18		
6	7,5	7,07	707	36,46	<b>L'indice Portant</b>	52,28
8	10	8,15	815	42,03	<b>Immédiat / CBR</b>	

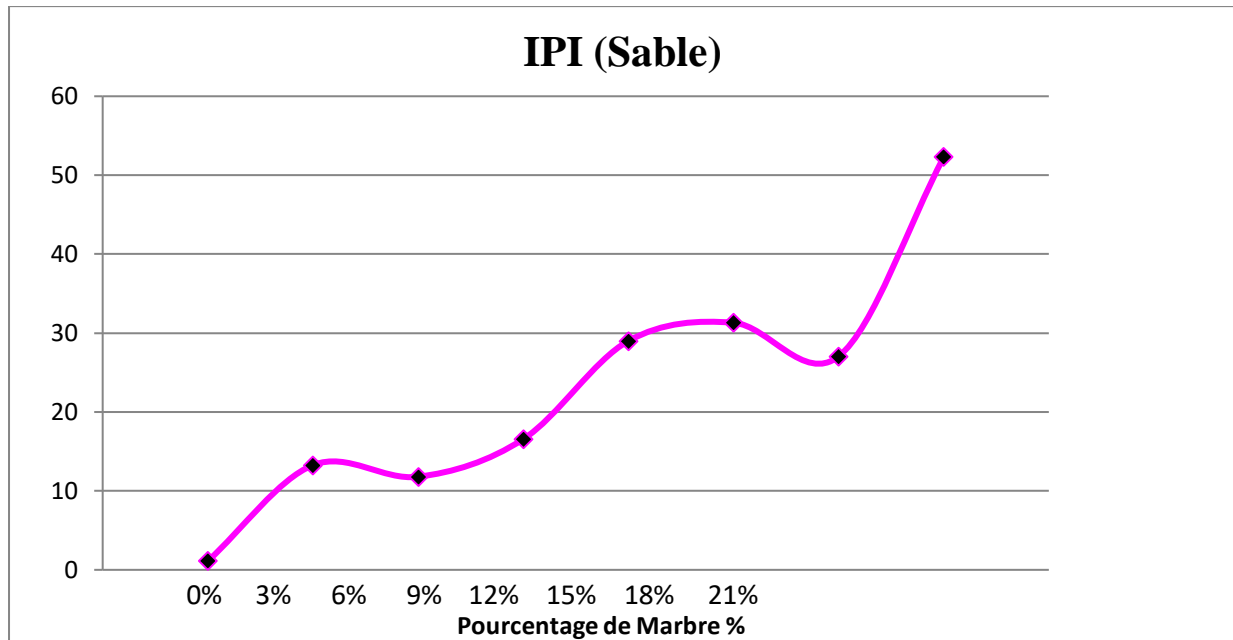


**Figure 4.12** Courbe essai CBR sable+21% marbre



**Tableau 4.12:** Les résultats de l'essai de CBR mélange de Sable avec % marbre

Marbre%	0%	3%	6%	9%	12%	15%	18%	21%
IPI (Sable)	11,1	13,26	11,79	16,55	28,99	31,31	27,04	52,28



**Figure4.13** Courbe résultats de l'essai de CBR mélange de Sable avec % marbre

**Tableau 4.1:** Comparaison des résultats de l'essai CBR d'une argile et d'un sable mélangé au différents pourcentages de marbre.

Marbre%	IPI Argile	Pourcentage de variation (%)	IPI (Sable)	Pourcentage de variation (%)
0%	43,9	100	11,1	100
3%	41,8	-4.78	13,26	18.94
6%	48,42	+10.3	11,79	5.74
9%	49,72	+13.26	16,55	48.43
12%	68,59	+56.24	28,99	160
15%	51,68	+17.74	31,31	180.8
18%	44,05	+0.34	27,04	142.2
21%	40,24	-8.34	52,28	368.9
24%	34,27	-21.96		
27%	21,73	-50.55		
30%	25,89	-41.06		



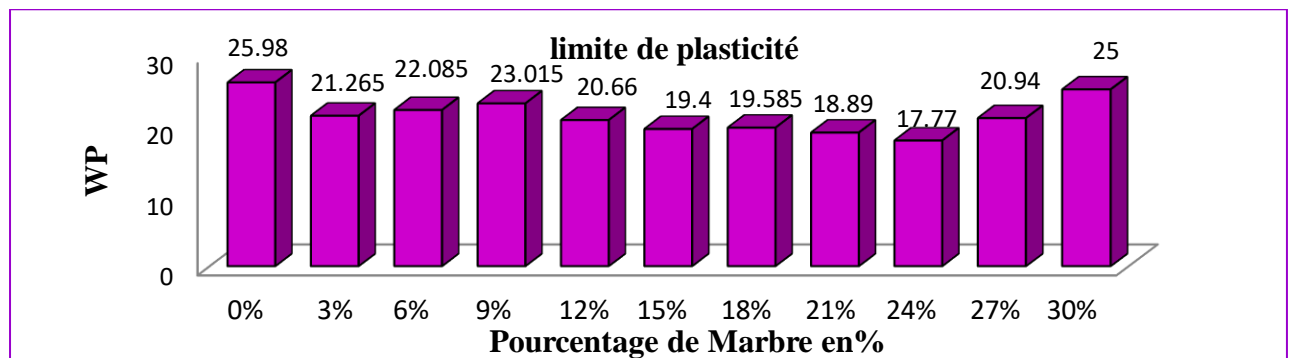
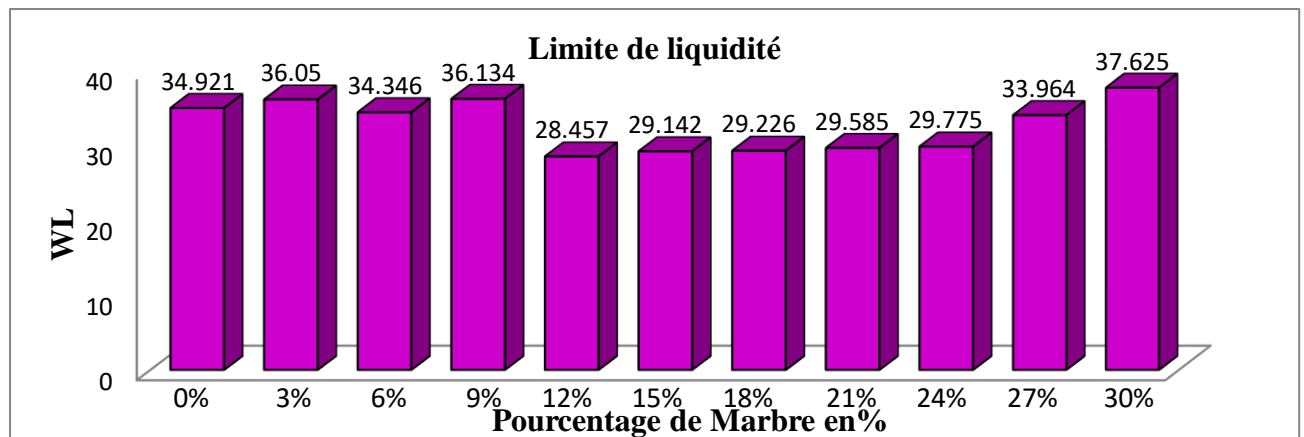
D'après le tableau 4.1, la poudre de marbre affecte fortement le sable que l'argile, des augmentations variants de 10% à 56% pour l'argile et de 18% à plus de 300% pour le sable.

### 5.Essai de limite d'Atterberg

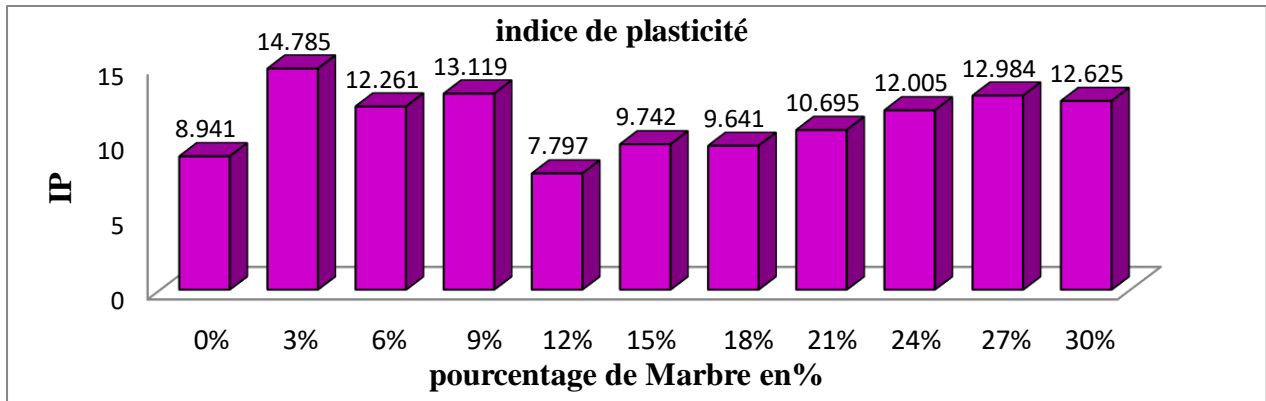
Les limites d'Atterberg sont des paramètres géotechniques destinés à identifier un sol et à caractériser son état. Le tableau suivant résume tous les résultats obtenus au niveau du laboratoire.

**Tableau.4.5** : les résultats d'essai limite de liquidité pour sol avec déchet poudre de marbre

Marbre %	WL	WP	IP	IC
0%	34,921	25,98	8,941	3,01
3%	36,05	21,265	14,785	1,897
6%	34,346	22,085	12,261	2,148
9%	<b>36,134</b>	<b>23,015</b>	<b>13,119</b>	<b>2,14</b>
12%	<b>28,457</b>	<b>20,66</b>	<b>7,797</b>	<b>2,62</b>
15%	29,142	19,4	9,742	2,17
18%	29,226	19,585	9,641	2,2
21%	29,585	18,89	10,695	2,01
24%	29,775	17,77	12,005	1,81
27%	33,964	20,94	12,984	2
30%	37,625	25	12,625	2,346





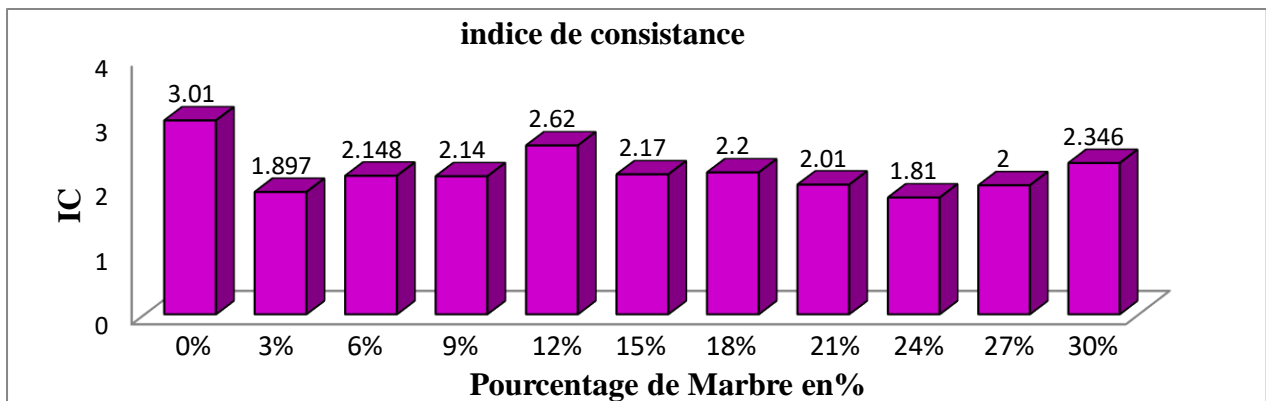


**Figure4.4:** Graphique comparative des essais limite d'atterberg entre WL, WP, IP.

#### Interprétation :

Le meilleur résultat de WL, WP, IP obtenu à partir de l'essai limite d'atterberg réalisé entre le mélange Sol + 9% et sol +12% marbre.

L'ajout de poudre de marbre agglutinera rapidement le sol en quelques minutes. Cette mesure améliore la consistance et augmente la limite de plastique, qui à son tour augmente la limite de liquidité. Cette évolution déplace la plage de plasticité vers une teneur en eau plus élevée. Comme indiqué sur la (Figure4.8), le sol a montré une diminution de l'indice de plasticité après l'augmentation de l'addition. La diminution de l'indice de plasticité indique une amélioration dans la maniabilité du sol. Plusieurs chercheurs ont montré la même tendance dans leurs travaux de recherche [Attoh Okine, 1995; Bagherpour et al., 2003, Sivapullaiah et al., 2003, Celal et Gokceglu., 2004, Ansary et al., 2006, Bozbey et al., 2010]. [20]



**Figure4.5.** Graphe de l'indice de consistance.

Dans l'histogramme ci-dessus, on remarque une augmentation d'indice de consistance allant de 13% la plus grande valeur est constaté à 12% de déchets de marbre avec une et une diminution à partir de 27% de marbre.



### **Conclusion :**

Dans ce chapitre on a fait une comparaison entre tous les résultats de chaque essai pour examiner le meilleur résultat ensuite l'amélioration de sol + marbre. Et cela on trouve que l'amélioration de sol avec le marbre donne des bons résultats pour 12% de poudre de marbre dans le cas de l'argile, il a donné des résultats efficace par rapport le sol sans additive. Concernant le mélange sable marbre, ce dernier affecte énormément l'indice de portance. Pour un début on peut juger que la poudre de marbre affecte énormément un sol granulaire qu'un sol fin. Donc incorporé une dose de 12% de marbre dans l'argile agit positivement sur l'amélioration de tous les paramètres géotechniques, et un indice de portance immédiat très fort pour le sable.





# **Conclusion Générale**



## Conclusion général

Actuellement, la technologie de traitement des sols est largement utilisée, cette technologie a atténué de nombreux problèmes. L'utilisation de chutes de marbre, Cette technique a donné des résultats positifs pour l'augmentations de la résilience des sols d'une part et le recyclage (conservation) de ces déchets d'autre part, à coût économique et un bon impact environnemental.

A partir de ces essais expérimentaux que nous avons réalisées en laboratoire sur le sol naturel pour en connaître les propriétés physiques et mécaniques dans le but de l'améliorer et de le renforcer en ajoutant la poudre de marbre, on conclut ce qui suit :

Une légère variation de la masse sèche de l'argile, d'environ 8% à 16%

L'incorporation du déchet en poudre de marbre dans l'argile a changé les caractéristiques de résistance au cisaillement, une amélioration à 12% de marbre.

Le meilleur résultat de l'indice portant obtenu à partir de l'essai CBR réalisé sur le mélange (argile + 12%) marbre qui donne IPI = 68,59 avec une augmentation de 36% par rapport au sol naturel.

En comparant tous les résultats de chaque essai et examinant le meilleur résultat on a trouvé que l'amélioration de l'argile avec le marbre donne des bons résultats pour 12% de déchet de poudre de marbre.

Concernant le mélange sable marbre, ce dernier affecte énormément l'indice de portance de ce type de sol.

Pour un début on peut juger que la poudre de marbre affecte énormément un sol granulaire q'un sol fin.

Donc incorporé une dose de 12% de marbre dans l'argile agit positivement sur l'amélioration de tous les paramètres géotechniques.

L'incorporation de poudre de marbre améliore très fortement le IPI pour le cas d'un sable.