

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE

*Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahim - Bordj Bou Arreridj*

*Faculté des Sciences et de la technologie*

*Département science et technologie*

# *Mémoire*

*Présenté pour obtenir*

**LE DIPLOME DE MASTER**

**FILIERE : Génie civil**

**Spécialité : Matériaux**

Par

- **Benmerzoug Ramdane**
- **Naidji Ahmed**

*Intitulé*

***Identification et traitement des sols a croute calcaire  
Expérimentation sur les des hauts plateaux***

*Soutenu le : 2021-2022*

*Devant le Jury composé de :*

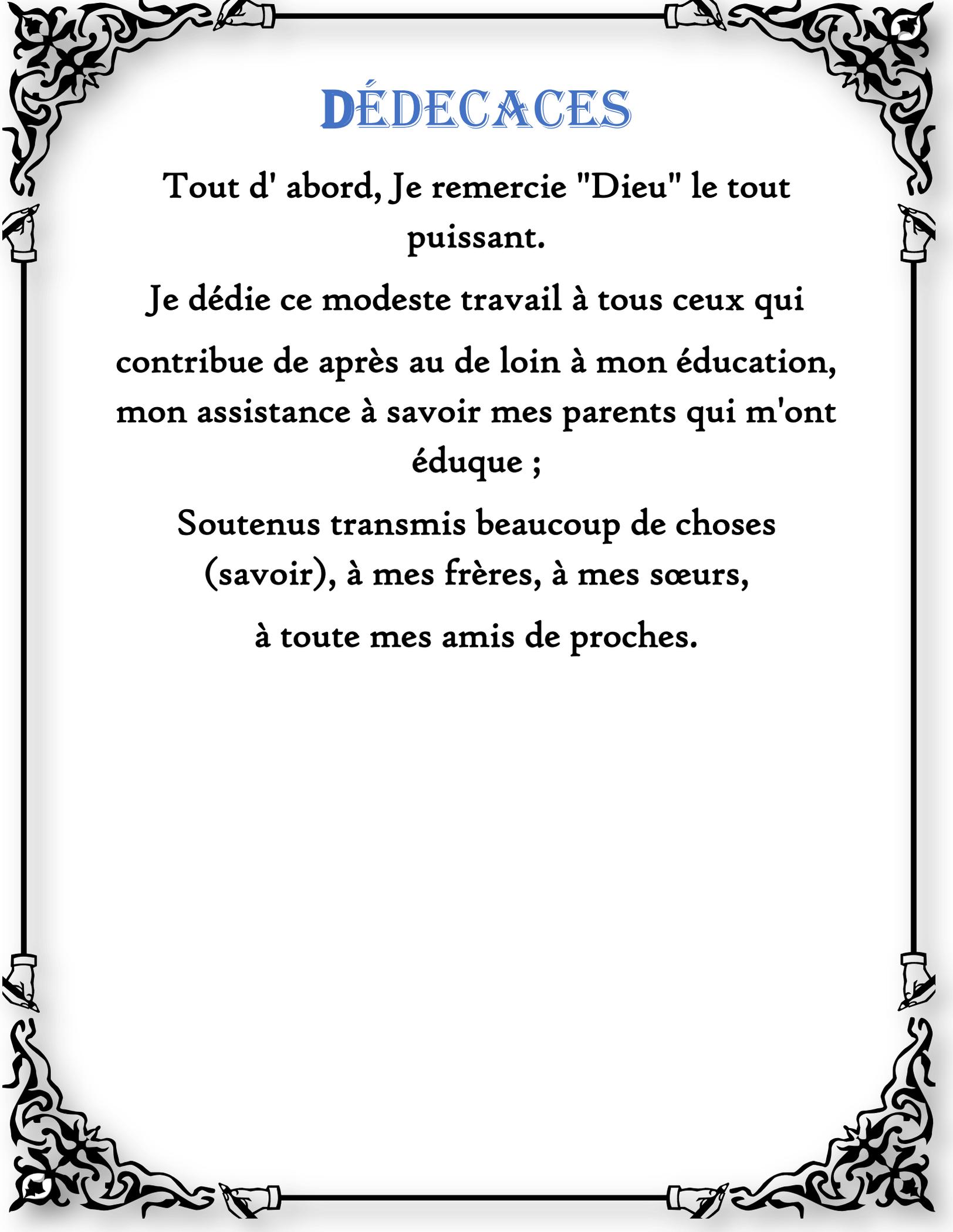
<i>Nom &amp; Prénom</i>	<i>Grade</i>	<i>Qualité</i>	<i>Etablissement</i>
<i>M. Ben Ammar Abdelhafid</i>	<i>MCB</i>	<i>Examineur</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>M. Belkadi Ahmed Abderraouf</i>	<i>MCA</i>	<i>Examineur</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>M. Achour Yacine</i>	<i>...</i>	<i>Encadreur</i>	<i>Univ-BBA</i>

# REMERCIEMENT

Je remercie tous les enseignants de la faculté des sciences et de La technologie – Université de Mohamed El- Bachir El Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj qui ont participés à ma formation durant les cinq dernières années.

je remercie mon encadreur Mr : achour yacine et les membres de jury qui a orienté et tous les professeurs de ma section,et bien sur :Mr lotfi et madam boukhari et l'équipe du Laboratoire des Travaux Publique L.T.P.E

Je remercie du fond du cœur tous ceux qui ont contribué a la réalisation de cette mémoire et particulièrement ma mère et mon père et mes frères et sœur et tous mes amis (hamidi,halim,housseem,ridha,louanasse,masoude)



# DÉDECACES

Tout d'abord, Je remercie "Dieu" le tout  
puissant.

Je dédie ce modeste travail à tous ceux qui  
contribue de près au de loin à mon éducation,  
mon assistance à savoir mes parents qui m'ont  
éduqué ;

Soutenus transmis beaucoup de choses  
(savoir), à mes frères, à mes sœurs,  
à toute mes amis de proches.

ان انجاز الطرق يعتمد أساسا على استخدام المواد الأولية التي يجب ان تكون بمواصفات مطابقة للمقاييس والتي بها نظمن نوعية جيدة، بعض المناطق في العالم تعاني من مشكلة نقص المواد الأولية المستخدمة في انشاء الطرق. يسعى الباحثون الى إيجاد بدائل فعالة واقتصادية كما يعد استخدام النفايات في تثبيت التربة مهم جدا من حيث إعادة تدوير النفايات والحد من التلوث البيئي. ان وفرة مسحوق الرخام يجعل منه أحد البدائل لهذه المشكلة .

الهدف الرئيسي من هذه الأطروحة هو تحسين خصائص الطيف في ولاية برج بوعريريج في بلدية خليل مع مسحوق الرخام واستخدامها في انجاز الطرق

### الكلمات المفتاحية

المواد الاولية-الخصائص الفيزيائية-الطيف-مسحوق الرخام

### Résumé

L'achèvement des routes dépend principalement de l'utilisation de matériaux qui doivent être conformes aux spécifications standard et avoir un bon système de qualité. Certaines régions du monde souffrent du manque de matières premières utilisées dans la construction des routes. Les chercheurs recherchent des alternatives rentables et efficaces, tandis que les déchets de la stabilisation des sols recyclent les déchets et réduisent la pollution de l'environnement. L'abondance de poudre de marbre en fait l'un des problèmes.

L'objectif principal de cet article est d'améliorer les caractéristiques du tuf de calcification dans le bordj Bou Arreridj de la commune de Khalil avec de la poussière de marbre et l'utilisation de routes de finition

### Mots clés

Matières premières-caractéristique physique-Tuf-poudre de marbre

### Abstract

The completion of roads depends mainly on the use of materials that must comply with standard specifications and have a good quality system. Some parts of the world suffer from a lack of raw materials used in road construction. Researchers are looking for cost-effective and efficient alternatives, while soil stabilization

waste recycles waste and reduces environmental pollution. The abundance of marble powder makes it one of the problems.

The main objective of this article is to improve the characteristics of the calcification tuff in the bordj Bou Arreridj of the commune of Khalil with marble dust and the use of finishing roads

**Keywords:**

raw materials-physical characteristics-Tuf-marble powder

## SOMMAIRE

## CHAPITRE 1 : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

I. Tuf calcaire .....	2
I.1 Introduction:.....	2
I.2 Definition de tuf:.....	2
I.3 Les tufs dans le monde:.....	2
I.4 Les encroutements calcaires : .....	5
I.4.1 Définition :.....	5
I.4.2 Formation des encroûtements calcaires: .....	5
I.4.3 Classification des encroutements calcaires: .....	7
I.4.4 Utilisation des calcaires en constructions routière: .....	10
Modes opératoires utilisés .....	12
II.1 ESSAIS PHYSIQUES .....	12
II.1.1 TENEUR EN EAU (NF P 94-050) .....	12
II.1.2 ANALYSE GRANULOMETRIQUE (NF P 94-056).....	13
2 ANALYSE GRANULOMETRIQUE PAR SEDIMENTATION (NF P 94-057) .....	18
II.3 LIMITES D'ATTERBERG (NF P 94-051).....	19
II.3.1 Principe [12] .....	20
II.3.2 Appareillage .....	20
II.3.3 Matériaux utilisés :.....	21
II.3.4 Détermination de la limite de plasticité : Wp.....	22
II.3.5 Calculs: .....	23
II.4 ESSAI DU BLEU METHYLENE (NF P 94-068).....	25
II.4.1 But :.....	25
II.4.2 Principe : .....	25
II.4.3 Matériels utilisés :.....	26
II.4.4 Mode opératoire :.....	27
II.4.5 Calculs et expression des résultats .....	28
II.4.6 Classification des sols d'après l'essai au bleu de méthylène .....	28
II.2 ESSAIS MECANIQUES.....	29
II.2.1 ESSAI PROCTOR (NF P94-093).....	29

## 7SOMMAIRE

II.2.2 Essai de résistance à la traction indirecte (Essai brésilien) et La résistance à la compression (NF EN 12390-6) .....	33
--	----

### CHAPITRE 2: CARACTERISATION DES TUF ETUDIE

I. Introduction:.....	36
Situation géographique de la zone d'étude ;.....	36
II.1 Localisation des échantillons:.....	37
II.1.1 Carrière tuf (khelil) : .....	37
II.1.2 Tuf de khelil.....	38
Mode de prélèvement .....	39
III.1 Etude d'identification des matériaux utilisés .....	39
III.1.1 Analyse granulométrique par tamisage :.....	40
III.1.2 Analyse granulométrique par sédimentation.....	43
III.1.3 Les limites d'Atterberg:.....	44
III.1.4 Essai au bleu de Méthylène : .....	46
III.1.5 Essai Proctor modifié .....	47
Conclusion ;.....	48

### CHAPITRE 3: VALORISATION DES TUF ETUDIE

I. Introduction.....	50
II. Traitement des tufs par la poudre de marbre.....	50
II.1 Préparation du matériau:.....	50
II.3 Préparation des mélanges et conservation des éprouvettes .....	51
II.4 Expression des résultats :.....	53
III. RESULTATS ET INTERPRETATIONS .....	53
III.1.2 Le poids des éprouvettes.....	57

Chapiter 01

<b>Tableau 1 Classification des encroûtements calcaires [1] .....</b>	<b>11</b>
<b>Tableau 2 Poids minimum du tamis requis en fonction de la taille du trou de maille du tamis.....</b>	<b>14</b>
<b>Tableau 3 Indice de plasticité Ip .....</b>	<b>24</b>
<b>Tableau 4 Ordre de grandeur .....</b>	<b>24</b>
<b>Tableau 5 Indice de consistance Ic.....</b>	<b>25</b>
<b>Tableau 6 Modalités d'exécution des essais Proctor normal et modifié .....</b>	<b>32</b>

Chapiter 02

<b>Tableau 7 Essais d'identification. ....</b>	<b>36</b>
<b>Tableau 8 résume les résultats des essais physique-mécaniques et chimiques (khelil).....</b>	<b>39</b>
<b>Tableau 9 Résultats de l'analyse granulométrique.....</b>	<b>40</b>
<b>Tableau 10 Résultats des limites d'Atterberg.....</b>	<b>44</b>
<b>Tableau 11 Résultats des limites de liquidité.....</b>	<b>44</b>
<b>Tableau 12 Résultats des limites .....</b>	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
<b>Tableau 13 Valeur au bleu de méthylène.....</b>	<b>46</b>

Chapiter 03

<b>Tableau 14 Valeur d'essai Proctor modifie .....</b>	<b>47</b>
--	-----------

**Chapiter 01**

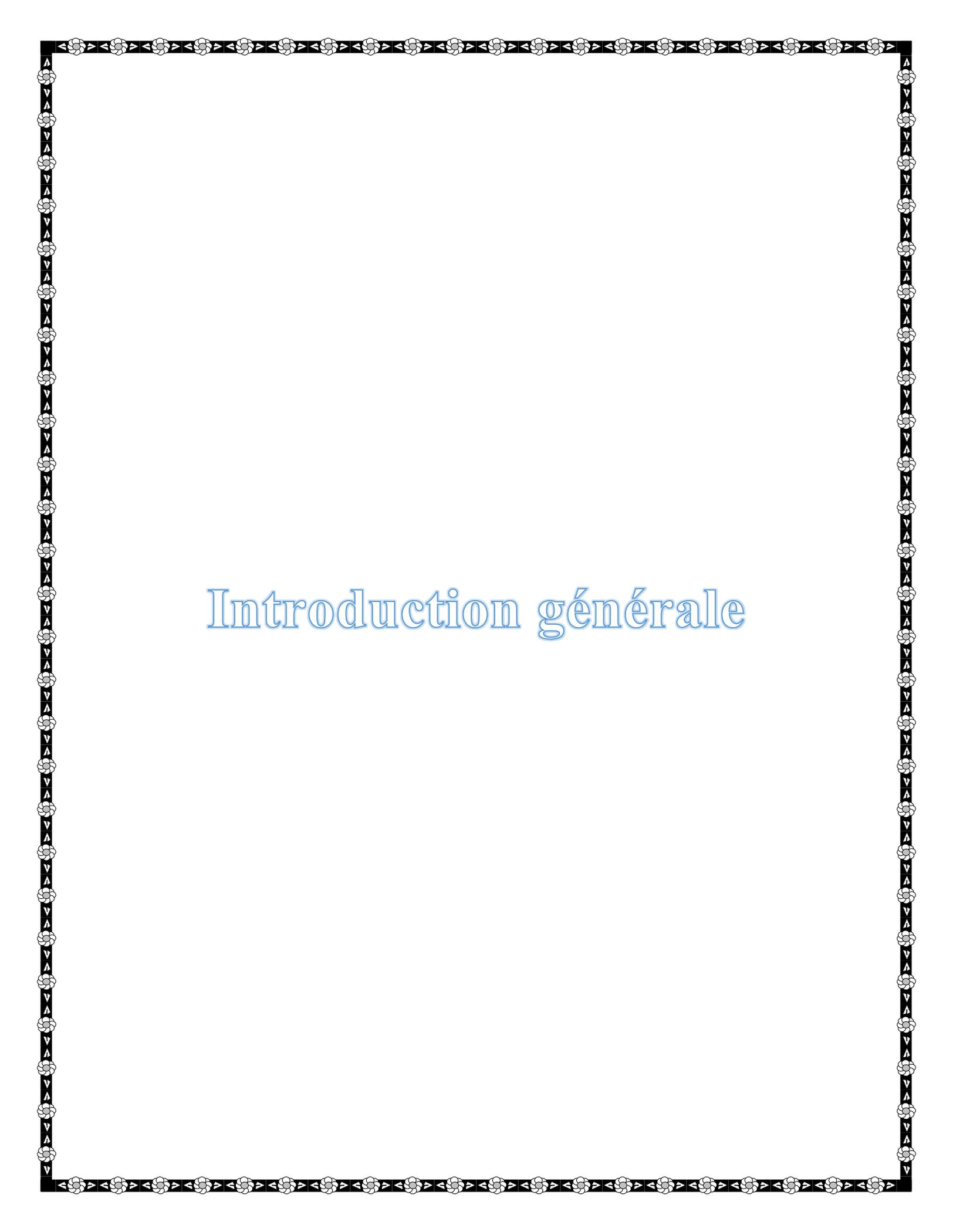
Figure 1 Répartition des encroûtements calcaires dans le monde	3
Figure 2 Répartition des encroûtements calcaires dans l'Algérie (Horta1979)	4
Figure 3 Schéma du circuit de la formation des tufs calcaires [1].	7
Figure 4 encroutement mur d'après (colombier,1988)	8
Figure 5 Appareillage utilisé	12
Figure 6 séchage de l'échantillon	15
Figure 7 Tamisage à sec	16
Figure 8 Agitateur manuel (NF P 94-057)	18
Figure 9 Matériel de l'essai sédimentométrie.	19
Figure 10 appareil de casagrande	20
Figure 11 Appareil de Casagrande avec un outil a rainuré et cale d'épaisseur.	22
Figure 12 Etapes de l'essai de limite de liquidité	22
Figure 13 Détermination de la limite de plasticité : Wp	23
Figure 14 détermination l'essai bleu méthylène (LTPE)	26
Figure 15 essai brésilien	34

**Chapiter 02**

Figure 16 Carte de localisation de la carrière étudiée (tuf)	37
Figure 17 localisation de la carrière de tuf khelil	37
Figure 18 prélèvement des échantillons	38
Figure 19 Courbe granulométrique par tamisage	41
Figure 20 Tableau synoptique de classification des matériaux selon leur nature (d'après GTR 2002)	42
Figure 21 Courbe des limites d'Atterberg	45
Figure 22 Essai au bleu de Méthylène	46
Figure 23 courbe D'essai Proctor modifie	48

**Chapiter 03**

Figure 24 Matériels utilisés	51
Figure 25 Mise en conservation des éprouvettes	52
Figure 26 écrasement de l'éprouvette	52
Figure 27 traité avec 10% poudre de marbre	54
Figure 28 traité avec 15% poudre de marbre	55
Figure 29 traité avec 20% poudre de marbre	56
Figure 30 évolution de poids des éprouvettes en fonction du temps	57
Figure 31 Histogramme de retrait des éprouvettes par a pour la date	58



# Introduction générale

## **Introduction générale**

Le réseau routier algérien comprend actuellement 1216 km de route de circulation est-ouest et 1100 km actuellement utilisés pour la circulation et plus de 12.700 km dont plus de 96.000 km pavés, 10.102 des ouvrages d'ingénierie sont situés 3.478 km sur la route de circulation est-ouest.

Le développement de l'infrastructure routière algérienne a conduit à la découverte de problèmes avec les matières premières, leur rareté, leur coût élevé et d'autres problèmes au niveau du sous-sol routier en raison de poids lourds.

À l'heure actuelle, les chercheurs ont dirigé leur étude dans le traitement, le contrôle et la mise en œuvre économique et environnementale des champignons limbiques.

Cependant, les matériaux locaux de la zone du plateau élevé, principalement du calcaire, peuvent être considérés comme une alternative dans la construction de fondations de chaussée et sont largement utilisés dans Géotechnique Routier.

Malheureusement, ces matériaux ne répondent pas aux exigences des spécifications, en particulier avec l'augmentation du trafic, en particulier les camions. Cependant, il est possible d'améliorer leurs propriétés mécaniques en les traitant.

Dans cette étude, nos travaux ont été orientés vers l'étude du comportement mécanique du mélange de poudre de marbre et de la malice des flotteurs dans la région de la tour Bordj Bou Arreridj pour une utilisation dans les techniques routières.

L'étude est divisée en deux sections :

- la première est pour la revue bibliographique et contient deux chapitres, la première fournira une synthèse des encres de calcaire, et l'ensemble des tests que nous avons fait pour connaître les caractéristiques du caramel.
- La partie II concerne l'étude pilote. Après avoir présenté le contexte géographique de la zone d'étude, la caractérisation physique et mécanique des tresses étudiées avant le traitement.
- La partie III est consacrée à l'étude du comportement mécanique des tresses calcaires après traitement à la poudre de marbre



# Chapitre I

## Synthèse bibliographique

## I. Tuf calcaire

### I.1 Introduction:

Le présent travail constitue une contribution à la recherche visant la caractérisation mécanique des chaussées en tuf et de poudre de marbre. Cette étude bibliographique comporte des définitions, de la conception du tuf, et leurs emplois en construction routière. [1]

### I.2 Définition de tuf:

Dans la bibliographie, les tufs se définissent comme des roches, friables, poreuses, légères et de couleur claire, elles datent du quaternaire, ces roches sont de constitution variable et résultent d'un certain nombre d'échanges par dissolution et précipitation.

Suivant leur composition, les tufs se regroupent en trois catégories : [1]

- Les tufs calcaires ;
- Les tufs gypseux ;
- Les tufs mixités;

### I.3 Les tufs dans le monde:

- **En Amérique** : Ce sont les hautes plaines des États-Unis allant du Texas à la Californie, celles du Mexique et celles de l'Argentine centrale.
- **En Afrique** : Ce sont les « Hamada », hauts plateaux de l'Afrique du Nord, la plaine de Djefara et le bassin de Ben Gazi en Lybie, les dépressions du nord du Kenya, les steppes de la Tanzanie, les plateaux de la Somalie, les vallées de Botswana et d'Afrique du Sud, les zones sèches de Madagascar et du Mozambique, la Namibie et l'Angola.
- **Au Moyen-Orient** : On rencontre le tuf au Liban, en Syrie, en Jordanie, dans les pays du Golfe Persique et en Inde dans les régions de Delhi et New Delhi.
- **En Australie** : On trouve le tuf dans les plaines littorales
  - **En Europe** : Le tuf y est peu abondant. On le trouve uniquement dans le sud de l'Espagne. La figure 1 représente la carte des zones de climat désertique, aride et semi-aride et des régions où existent les encroûtements calcaires. [2]

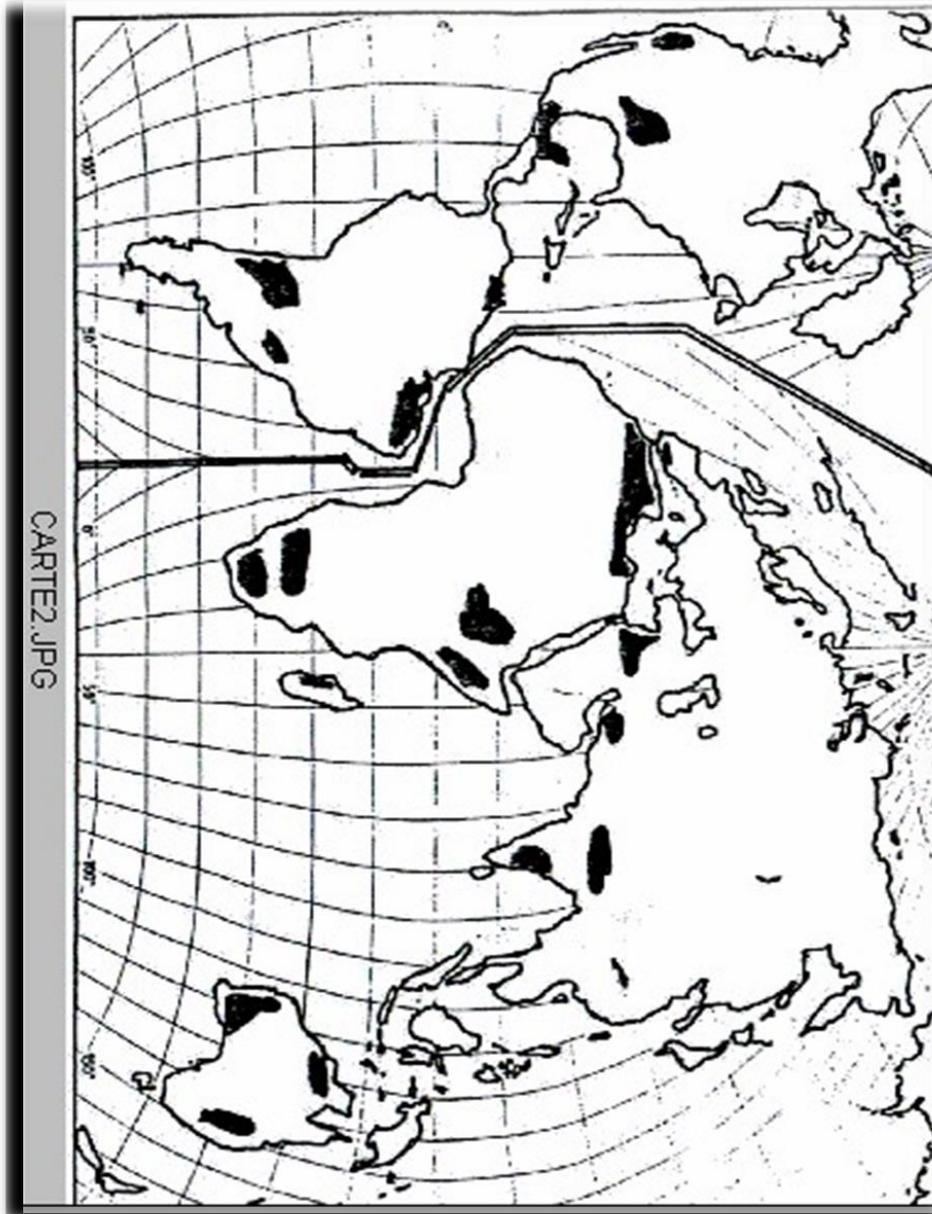


Figure 1 Répartition des encroûtements calcaires dans le monde

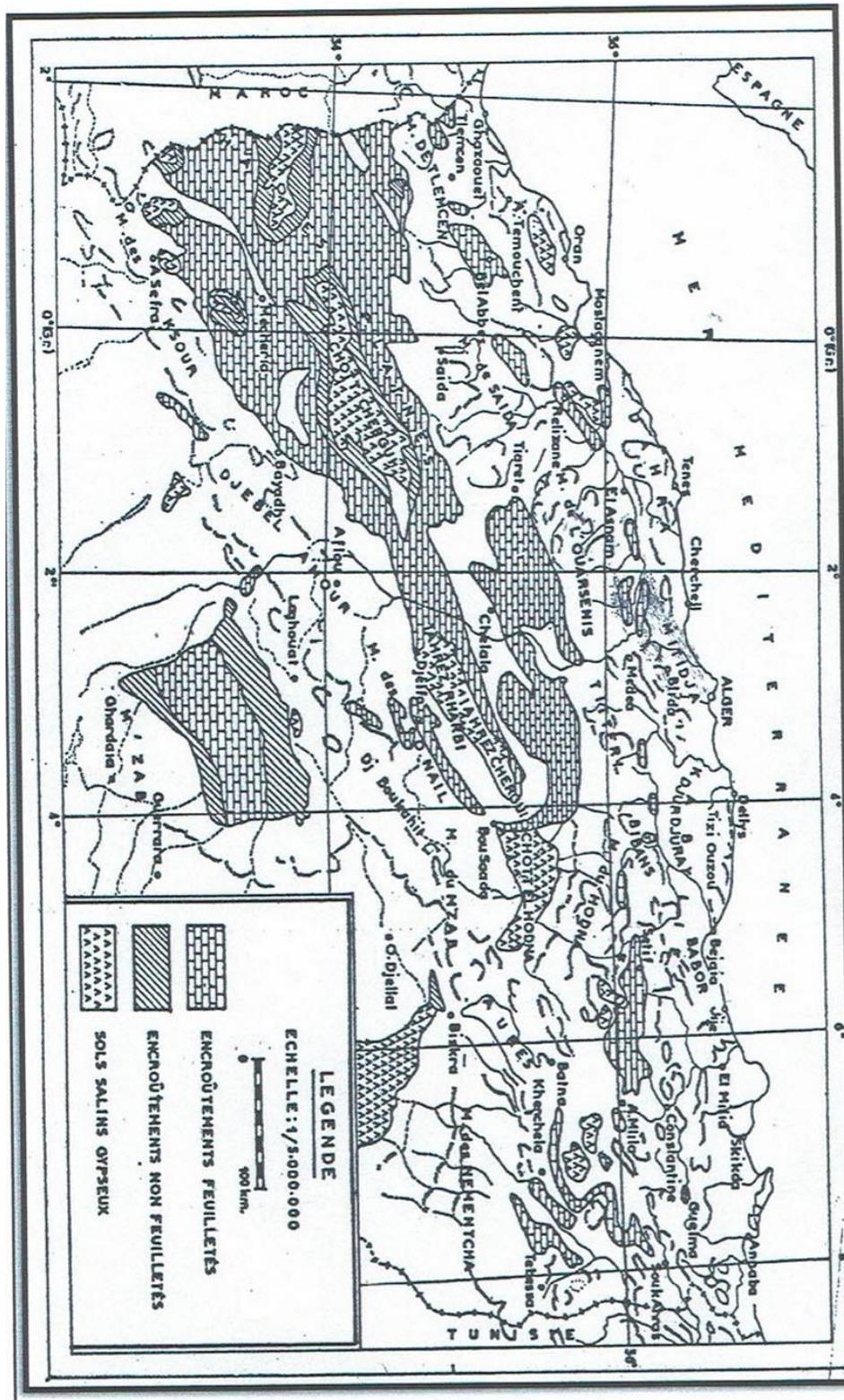


Figure 2 Répartition des encroûtements calcaires dans l'Algérie (Horta1979)

## I.4 Les encroutements calcaires :

### I.4.1 Définition :

Selon les différentes spécialités en géologie, pédologie ou la géotechnique, de nombreuses définitions ont été données aux encroutements calcaires. Parmi ces définitions on peut retenir celle formulée par A.J. GOUDIE. [3]

La croûte de chaux est un matériau terrestre composé de carbonate de calcium. La croûte existe à l'état nodulaire ou très insaturé elles sont causées par le processus de cimentation, d'accumulation ou de déplacement de sols ou de calcaires plus ou moins modifiés dans une zone d'infiltration

### I.4.2 Formation des encroûtements calcaires:

La formation des encroûtements calcaires correspond à certaines conditions climatiques critiques , pour que les sols s'encroûtent de manière appréciable, les doivent être capables de solubiliser des quantités importantes de sans toutefois excéder un certain seuil au-delà de ce qu'elles emporteront la totalité ou la majeure partie de ces vers les bassins ces conditions climatiques peuvent être illustrées par le climat qui règne dans les zones méditerranéennes subhumides et semi-arides (De Os Horla, 1979). Depuis près d'un siècle la question de l'origine des formations a été sans cesse controversée ; de nombreux auteurs se sont intéressés au processus de ces accumulations dans le sol (Boulaine, 1961 ; Durand, 1963 ; Briot, 1976, Ruellan, 1980 ; Pougel, 1980u ; rugi, Benmuli, 1993). Différentes hypothèses génétiques sont avancées pour expliquer les accumulations calcaires dans les sols : les genèses pédologiques (Boulaine, 1961 ; Ruellan, 1976 ; Pouget ; 1980), ou la genèse sédimentaire (Gaucher, 1948 ; Vogt, 1984). Ainsi, trois hypothèses sont avancées pour expliquer les accumulations calcaires dans le sol L'hypothèse de l'ascensum utilise des processus impliquant la montée de la solution par les capillaires du sol et la précipitation en surface de la matière dissoute.

- **L'hypothèse par Descensum** : Sous climat aride ou semi-aride, la croûte se forme par lessivage de la partie supérieure du sol et l'accumulation carbonatée s'opère à la base de la zone lessivée. Au carbonate provenant du lessivage peuvent s'ajouter des apports latéraux en solution



La figure 3 représente schématiquement le circuit qui aboutit à la création des encroûtements calcaires.

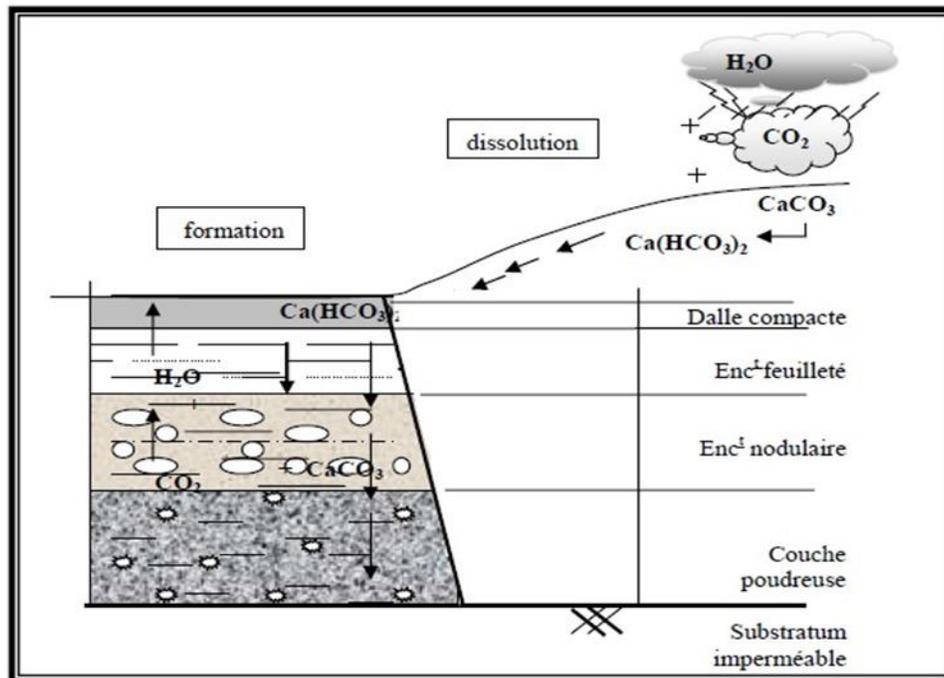


Figure 3 Schéma du circuit de la formation des tufs calcaires [1].

L'eau est plus chargée qu'à basse température et son mouvement est plus lent, Lorsqu'elle atteint les plaines ou les plateaux, pénétrant le sol pendant la saison sèche, le niveau de la nappe phréatique commence à baisser sous l'effet de l'évaporation et surtout de la végétation. A ce moment on assiste au phénomène de capillarité dû à la tension superficielle caractérisée par le potentiel capillaire. Cette pression négative est nécessaire pour la précipitation du calcaire selon la réaction suivante : [1]



L'élévation de la température accélère la réaction mais la dépression joue un rôle fondamental.

#### I.4.3 Classification des encroûtements calcaires:

##### A. Évolution et âge des encroûtements calcaires ;

Le calcaire se concentre dans un premier temps de manière discontinue sous forme d'amas friables et de nodules durs. Au fur et à mesure du dépôt, la teneur en carbonates du sol s'élève et la concentration devient continue et masque la couleur primitive du sol, à partir de ce stade se produisent ce que (Ruellan, 1976) appelle les phénomènes pédologiques qui progressivement transforment les différents horizons des sols. L'évolution finale est l'encroûtement mûr figure 4

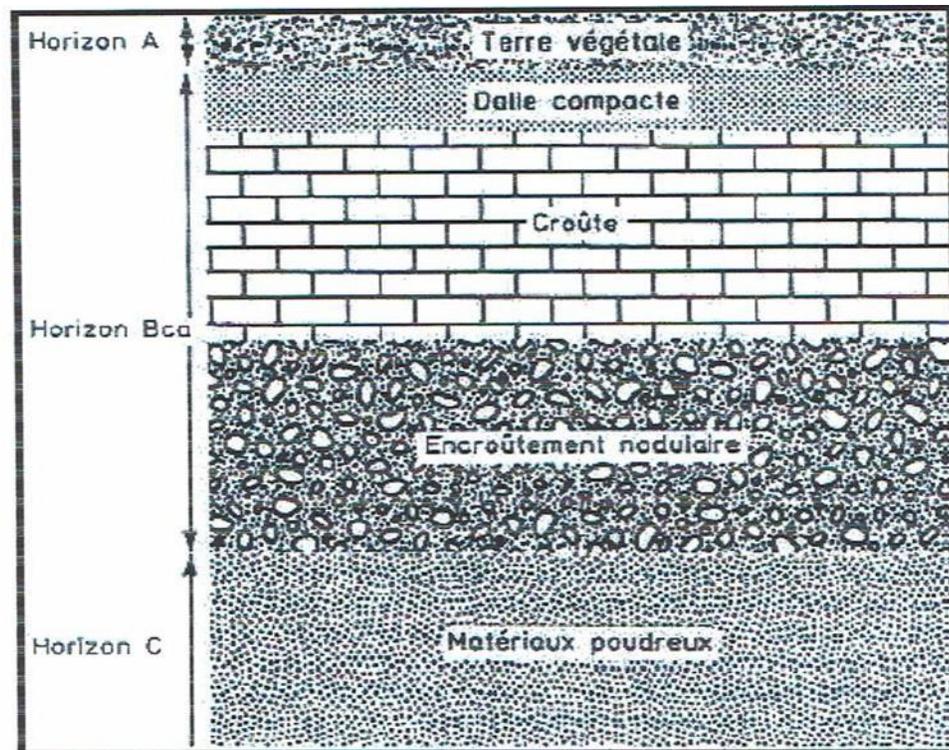


Figure 4. Encroûtement mûr d'après (Colombier, 1988)

Figure 4 encroûtement mur d'après (colombier,1988)

Un sol sera passé par tous ces stades présentera un profil très différencié. On distinguera, du haut vers le bas, les horizons suivants

**Horizon A** : C'est la couche de terre végétale dont l'épaisseur peut atteindre quelques décimètres voire être inexistante en cas d'érosion, de couleur sombre.

**Horizon B** (ou horizon d'accumulation) C 'est l'horizon de l'encroûtement proprement dit son épaisseur peut varice de quelques décimètres à plusieurs mètres le calcaire y est abondant (40 à 90 0/0), la couleur est blanchâtre. Il comprend le plus souvent :

Une dalle compacte, dure à forte teneur en carbonates et dont l'épaisseur peut atteindre une vingtaine de centimètres,

La croûte constituée par une superposition de feuillets, de dureté plus faible que celle de la dalle, son épaisseur variable peut atteindre deux mètres. La différenciation entre croûte et dalle n'est pas toujours évidente.

Une zone nodulaire, il s'agit de nodules calcaires durs pris dans une gangue calcaire plus ou moins pulvérulente.

C'est l'horizon B qui nous intéresse comme matériau Routier, après décapage de la terre végétale et le ripage de la carapace (dalle ou/et croûte).

**Horizon C** : C'est le matériau d'origine dans lequel on rencontre cependant, quelques nodules. L'enrichissement en calcaire est faible, de couleur blanchâtre.

D'après Ruellan (cité par Alloul, 1981) les croûtes les plus jeunes sont de 15 à 20.000 ans d'âge, alors que l'encroûtement mûr où la dalle compacte est présente, plusieurs centaines de milliers d'années. Ce sont donc des formations Quaternaires plus précisément d'âge Villafranchien à l'actuel.

En Algérie, les encroûtements des zones à climat semi-aride sont puissants et comportent des croûtes plus ou moins feuilletées et des dalles compactes très épaisses. Les encroûtements Salés tiens ont très souvent développés (De Os Horta, 1979)

L'Algérie est divisée en quatre zones climatiques (De Os Horta, 1979)

- **Zone I** : zone humide  $P > 600$  mm
- **Zone II** : zone subhumide  $350 < P < 600$  mm
- **Zone III** : zone semi-aride  $100 < P < 350$  mm
- **Zone IV** : zone aride ou désertique  $P < 100$  mm

## **B. Classification selon la teneur en carbonate de calcium( $\text{CaCO}_3$ ) [1]**

La classification de Ruellan établie pour la géologie du Maghreb, semble avoir un caractère relativement universel puisqu'elle est très voisine de celle de Netteberg établie à partir des études faites en Afrique du sud et en Australie [7]. Ruellan propose trois grandes catégories:

### **Distributions diffuses :**

La teneur en calcaire est très faible. Le calcaire n'est pratiquement pas visible à l'œil nu.

### **Concentration discontinues :**

La teneur en calcaire devient plus élevée (40 à 60 %) les concentrations de calcaire se présentent sous la forme de nodules durs de 1 à quelque  $\text{cm}^3$  ou sous la forme de modules, ou d'amas friables qui s'écrasent facilement.

### **Concentration continues:**

Lorsque la concentration en calcaire se poursuit (teneur en  $\text{CaCO}_3 > 60\%$ ) elle devient continue, on a alors affaire aux encroûtements calcaires proprement dits.

La classification proposée par Ruellan pour les concentrations continues, est résumée sur le tableau I.1

### **I.4.4 Utilisation des calcaires en constructions routière:**

Selon leurs caractéristiques, les tufs calcaires sont utilisés dans différents cas :  
Couches de fondation, couches de base, couches de forme et en accotement  
Pistes agricoles, routes moyennement ou fortement circulées et même autoroutes  
Remblais.

Actuellement l'utilisation la plus courante des tufs calcaires est la réalisation de couches d'assises (Fondation et base) de routes à moyen ou faible trafic. Les spécificités d'utilisation des tufs calcaires en construction routière en Algérie [6].

**Tableau 1 Classification des encroûtements calcaires [1]**

DENOMINATION		DESCRIPTION	ENEUR CaCO <sub>3</sub>	PAISSEUR	APPORTS MUTUELS
Encroûtements non feuilletés	Encroûtements massifs	Structure massives Où polyédrique	> 60	0.3 à 2.0 m (le plus souvent)	Sous les encroûtements non feuilletés, il y a toujours des amas friables avec ou sans nodules
	Encroûtement s nodulaires	Structure nodulaire Et polyédrique			
Encroûtements feuilletés	Croûtes Sensu strictu	Feuillets superposés Et discontinus D'encroûtement Massif ou nodulaire D'épaisseur millimétrique À centimétrique croissant Du Bas en haut.	> 70	Quelques centimètres à >1m	Sous les croûtes, il y a presque toujours des encroûtements non feuilletés. Les dalles compactes n'existent qu'au sommet des croûtes et peuvent remplacer entièrement celles-ci. Des pellicules rubanées sont presque toujours associées à la dalle compacte dont tapissent la surface supérieure et les fissures.
	Dalles compactes	Feuillets de Croûte pétrifiés, Épaisseur de quelques Centimètres à plusieurs décimètres			

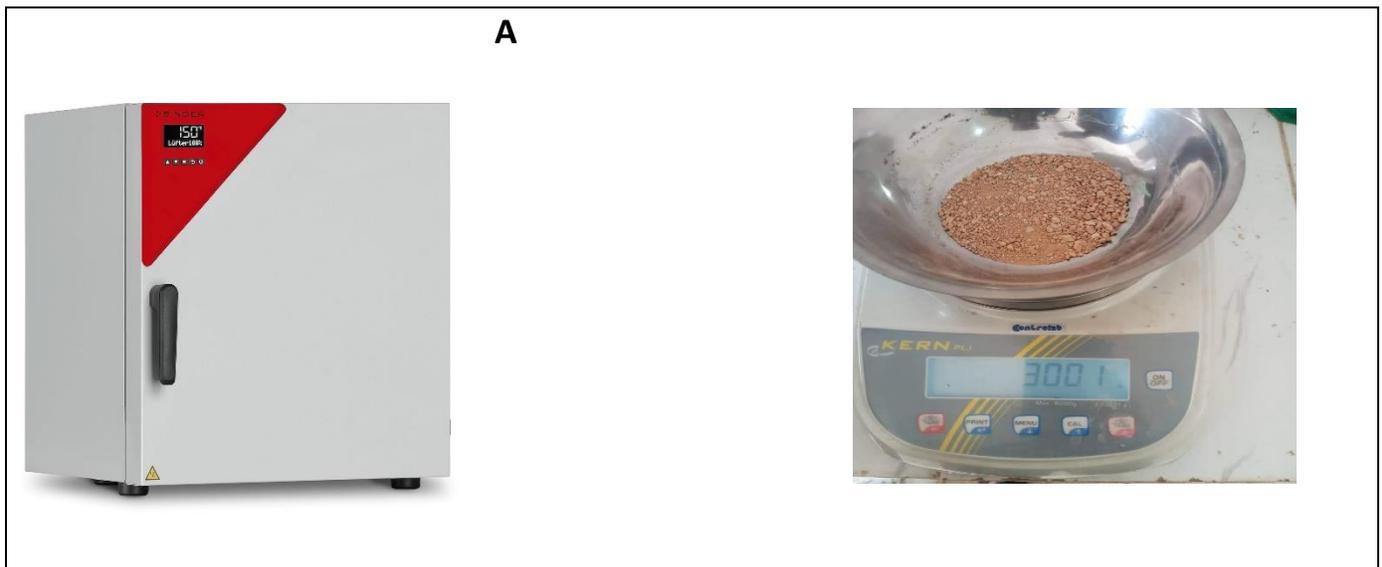
## Modes opératoires utilisés

### II.1 ESSAIS PHYSIQUES

#### II.1.1 TENEUR EN EAU (NF P 94-050)

##### A. Principe de la détermination de la teneur en eau

La déshydratation de l'échantillon de matériau est due à la cuisson. La masse de l'échantillon et l'eau évaporée ont été pesées.



**Figure 5 Appareillage utilisé**

##### B. Appareillage

- Etuve réglable à 500 C et à 1050C (figure 5a) ;
- Balance permettant les pesées avec une incertitude maximale de 1/1000 de la pesée (Figure 5b)
- Des capsules (Figure 5b)

##### C. Mode opératoire

1. Prélever un échantillon de sol représentatif, sa masse est choisie en fonction de la taille des éléments qu'il contient.
2. Placer l'échantillon sur une capsule.
3. Peser immédiatement, c'est-à-dire Ph.
4. Sécher au four à 1050C pour les matériaux insensibles à la chaleur et à 500C pour les matériaux sensibles à la chaleur (gypseux, latéritiques ou s'ils

contiennent des matières organiques), jusqu'à ce qu'ils soient complètement secs et stables en poids (le temps de séchage total peut donc varier de quelques heures à plusieurs jours).

5. Peser l'échantillon sec immédiatement après sa sortie de l'étuve, ou après son refroidissement dans un dessiccateur, soit PS.

#### **D. Expression des résultats**

La teneur en eau est déterminée par la formule suivante.

$$w \% = \frac{Ph + Ps}{PS}$$

Avec.

**W** : teneur en eau (exprimée en%).

**Ph** : poids de sol humide en(g).

**PS** : poids de sol sec en(g).

### **II.1.2 ANALYSE GRANULOMETRIQUE (NF P 94-056)**

#### **A. Objectif de l'essai**

Le but de l'analyse granulométrique est de déterminer les proportions pondérales des grains de différentes tailles dans le sol. Elle est réalisée

- Par tamisage (tamis à maille carrée) pour les grains dont le diamètre est supérieur à 80µm.

#### **B. Principe de l'essai :**

L'essai consiste à séparer les grains agglomérés d'une masse connue de matière par brassage sous eau, à fractionner cette terre, après séchage, au moyen d'une série de tamis et à peser successivement le refus accumulé sur chaque tamis. La masse des refus accumulés sur chaque tamis est rapportée à la masse sèche totale de l'échantillon soumis à l'analyse.

#### **C. Mode opératoire**

- choix du dm ; plus la maille du tamis à utiliser est grande
- procéder à une prise d'essai sur le matériau prélevé conformément du tableau

5

- Éliminer les éléments de dimension supérieures à  $D_{max}$  en notant la dimension approximative des plus gros éléments

**D. partage de l'échantillon**

- Eliminer, manuellement si nécessaire, les éléments qui ont une taille supérieure à  $d_m$  ;
- Effectuer une prise d'essai de façon à obtenir une masse de tamisât au tamis  $d_m$  supérieure ou égale à celle donnée dans le tableau 5;

**Tableau 2 Poids minimum du tamis requis en fonction de la taille du trou de maille du tamis**

Masse minimale de tamisât nécessaire en fonction de la dimension des mailles du tamis														
Tamis d mm	5	6,3	8	10	12,5	16	20	25	31,5	40	50	63	80	d>80mm
Masse m kg	0,3	0,4	0,5	0,8	1,2	2	3	5	8	12	20	30	50	$m = 6 \times 10^{-6} \times d^{3.66}$

**E. traitement des refus au tamis d'ouverture de ;**

- **Lavage**
  - Laves le contenu du tamis a faible débit d'eau jusqu'à ce qu'il que ne reste que
  - Des éléments propres
  - Recueillir le tamisât issu du lavage dans un récipient.
  - Rassembler dans un autre récipient les éléments de dimension à  $d_e$  et sécher jusqu'à masse constante
- **Séchage**

Le récipient contenant les éléments de dimension supérieure à  $d_c$  est mis à sécher L'évaporation de l'eau est terminée lorsque la masse du matériau contenu dans le récipient ne varie pas de plus de 2/1000 entre deux pesées successives effectuées à un intervalle de temps  $t$  qui est au minimum :

- De 1h dans le cas d'un étuvage à 1050C.
- De 2h dans le cas d'un étuvage à 500C.



**Figure 6 séchage de l'échantillon**

- **Tamisage à sec**
- Verser tous le matériau sèche au sommet d'une colonne d'au moins trois tamis d'ouverture de maille décroissante du haut vers le bas entre dm et dc et ayant à sa base un fond de tamis,
- Agiter manuellement ou mécaniquement la colonne de tamise. Pour cette phase, il peut être utilisé un vibrotamis ;
- Terminer le tamisage en remuant soigneusement le matériau à la main, jusqu' à ce que plus aucun élément ne passe à travers les mailles de chaque tamis ;
- Ajouter le tamisât obtenu au tamis d'ouverture dc au tamisât à dc obtenu à l'issue de l'opération de partage décrite au paragraphe **D**



**figure 7 Tamisage à sec**

**F. Traitement des passants au tamis d'ouverture (dc)**

- Laisser décanter et sécher à 50°C le tamisât issu du lavage des éléments > à dc,
- Ajouter ce tamisât aux éléments < à dc
- Malaxer la totalité des tamisât afin d'obtenir un mélange homogène puis peser mh.
  - Afin de connaître des matériaux secs utilisés ;
  - Prélever et peser une masse mhl, conforme au tableau 5
  - Sécher et peser msl ;

L'intervalle de temps t entre deux pesées successives de la tamis séché msl est minimum ;

- De 4 h dans le cas d'un étuvage à 100°C
- De 8 h dans le cas d'un étuvage à 50°C

**G. Expression des résultats**

- **Pourcentage massique de refus**

$$(100-P) = \frac{100 \times R}{m}$$

$$ms = Rc + mh \left( \frac{ms1}{mh2} \right)$$

Le refus équivaut sur le tamis d'ouverture d avec  $d \leq d_c$  est :

$$R = R_c + b \cdot r_i$$

$R_c$  : désigne la masse des refus cumulés sur le tamis d'ouverture  $d_c$ .

$b$  : désigne le refus d'échantillonnage pour la fraction granulométrique ( $O ; d_c$ )

$$b = m_{hl} / m_{h2}$$

$R$  : désigne le refus cumulé de matériau sec sur les tamis d'ouverture  $d < d_c$

Les résultats sont arrondis au pour cent

- **Pourcentage massique de passant** Le pourcentage massique de passant est:

$$P = 100 \times (1 - R/ms)$$

- **les facteurs de courbure et d'uniformité**

Facteur de courbure et calculé à partir de ;  $C_C = (d_{30})^2 / (d_{10} \times d_{60})$

Facteur d'uniformité à partir de ;  $C_C = d_{60} / d_{10}$

## 2 ANALYSE GRANULOMETRIQUE PAR SEDIMENTATION (NF P 94-057)

L'analyse granulométrique par sédimentation, appelée aussi sédimentométrie, est un essai géotechnique qui complète l'analyse granulométrique par tamisage d'un sol.

S'applique aux éléments d'un sol naturel passant à travers le tamis à maille carrée de 80  $\mu\text{m}$  d'ouverture. Les particules inférieures à 1  $\mu\text{m}$  ne peuvent être différenciées par cet essai.

### A. Principe

Utilise le fait que dans un milieu liquide au repos, la vitesse de sédimentation des grains fins à très fins dépend de leur taille. Dans le cas de grains sphériques de même densité, la loi de Stokes donne la relation entre le diamètre des grains et la vitesse de sédimentation.

Par convention, cette loi est appliquée aux éléments d'un sol pour déterminer les diamètres équivalents des particules

### B. Appareillage

Balance,

Tamis

Eprouvettes d'essais

Agitateur électrique ;

Eau distillée ou déminéralisée et flocculant

Thermomètre,

Chronomètre,

Agitateur ;

Densimètre.

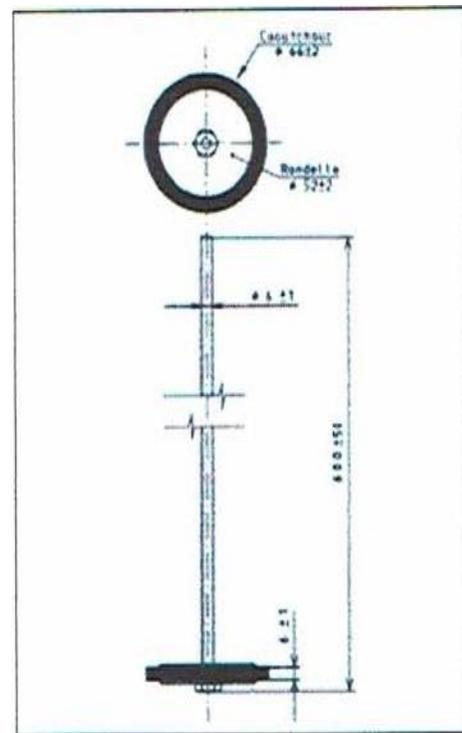


Figure 8 Agitateur manuel (NF P 94-057)

## C. Mode opératoire

### Préparation de la prise

#### Traitement de l'échantillon de sol

- Passez l'échantillon à travers un tamis de 80  $\mu\text{m}$  ;
- Vaporiser le tamis pendant 4 heures à 105°C ;
- Désagréger et homogénéiser le tamis ;
- Echantillon Sable dunaire Tuf
- Imbibez un échantillon test de 2 g ;
- Placer l'échantillon test dans le récipient utilisé avec l'agitateur mécanique ;
- Ajouter 500 cm du mélange (440 cm<sup>3</sup> d'eau distillée + 60 cm<sup>3</sup> d'examétophosphate de sodium à 5%).
- Laissez tremper l'échantillon pendant au moins 15 heures ;
- Agiter sur un agitateur mécanique ;
- Verser la suspension dans un tube à essai ;
- Compléter au cm avec de l'eau distillée à température ambiante.
- Plonger le thermomètre et le densimètre dans le tube à essai de contrôle ;

Prendre des mesures aux moments suivants sans enlever le densitomètre, immerger le densitomètre dans la solution au moins 30 secondes avant la mesure

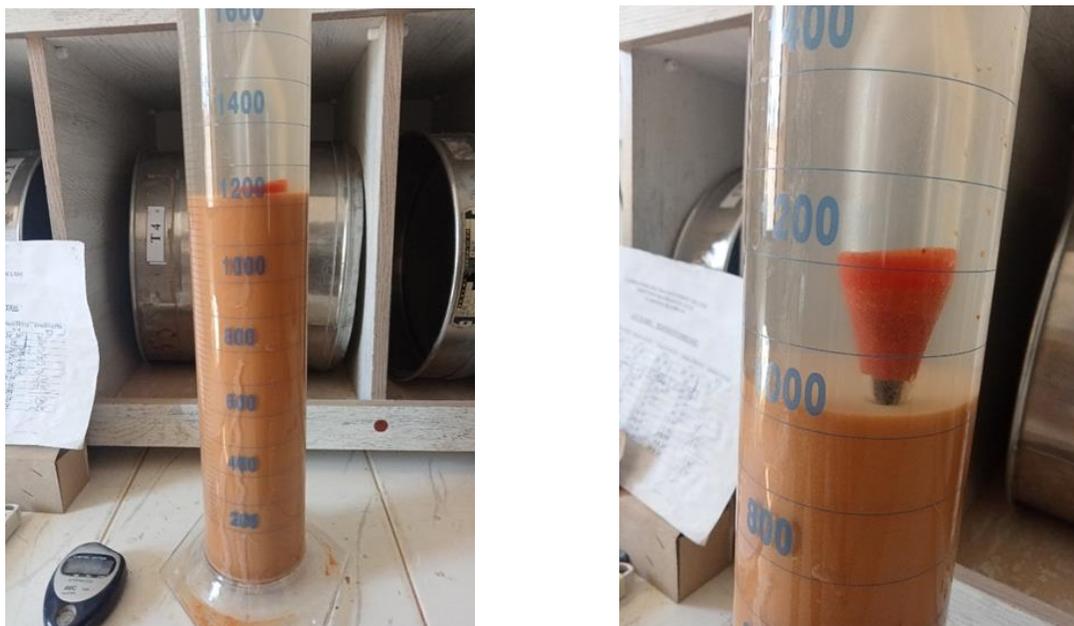


Figure 9 Matériel de l'essai sédimentométrie.

### II.3 LIMITES D'ATTERBERG (NF P 94-051)

Détermination de limite de liquidité des sols sur la fraction passant au travers du tamis à maille carrée de 400  $\mu\text{m}$  d'ouverture nominale

La limite de liquidité est l'un des paramètres géotechniques destiné à identifier un sol et à caractériser sa nature.

Il varie entre 5 (non mesurable) et 25% (non mesurable  $< PI < 25$ )

### II.3.1 Principe [12]

- L'essai s'effectue en deux phases :
- Recherche de la teneur en eau pour laquelle une rainure pratiquée dans un sol placé dans une coupelle de caractéristiques imposées se ferme lorsque la coupelle et son contenu sont soumis à des chocs répétés ;
- Recherche de la teneur en eau pour laquelle un rouleau de sol, de dimension fixée et confectionné manuellement, se fissure de longueur ( $\approx 15$  cm). Avec des diamètres compris entre 3 et 2 mm

### II.3.2 Appareillage

Appareil de Casagrande, outil à rainure, Balance, tares, étuve.

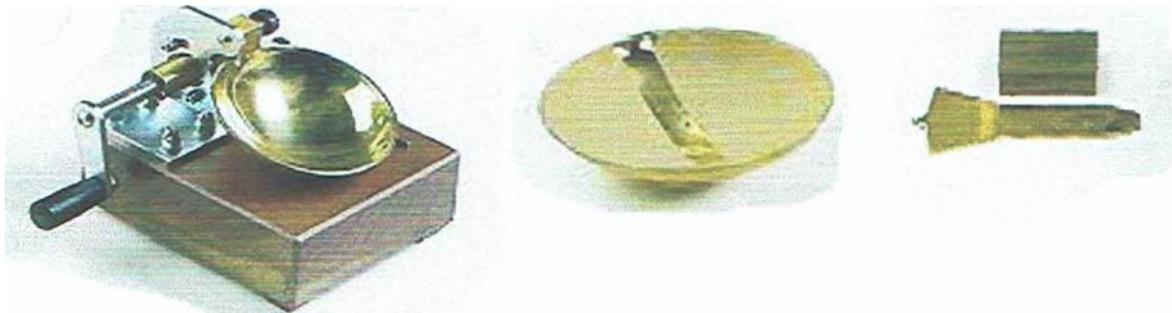


Figure 10 appareil de casagrande

#### Limite de liquidité :

-Appareil de Casagrande. -Outil à rainuré. -Cale d'épaisseur 10 mm

#### Limite de plasticité :

-Plaque de marbre. -Sèche — cheveux. -Capsules de pesée.

#### Divers :

-étuve. -Balance. -Spatule-Pissette. -Chronomètre indiquant la seconde.

### **II.3.3 Matériaux utilisés :**

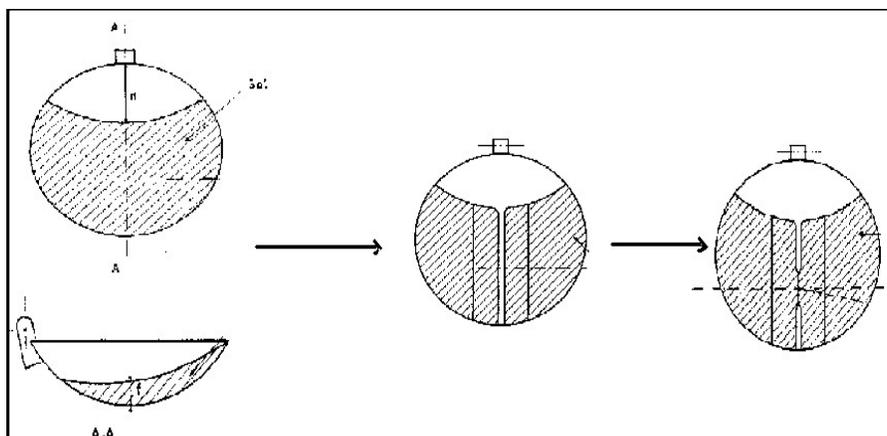
-échantillon argileux déjà préparé

#### **A. Détermination de la limite de liquidité : WL**

1. Prendre environ 200 g de sol préalablement tamisé au tamis 0,4 mm
2. Malaxer le sol avec une de l'eau afin d'obtenir une pâte homogène et presque fluide.
3. Prendre une partie de la pâte et l'étaler dans la coupelle de l'appareil de Casagrande à l'aide de la spatule. 4. Pratiquer une rainure dans cette pâte afin de la diviser en deux. L'outil à rainurer devra être tenu perpendiculairement à la coupelle en présentant sa partie biseautée face à la direction du mouvement.
5. Soumettre la coupelle et le matériau qu'elle contient à des chocs répétés avec une cadence de 2 coups par seconde.
6. Arrêter les chocs quand les deux lèvres se rejoignent sur environ 2 cm, noter le nombre de coups N correspondant.
7. Prélever des deux côtés des lèvres à l'endroit où elles se sont refermées environ 5 g de sol afin d'en déterminer la teneur en eau.
8. Homogénéiser 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.



**Figure 11** Appareil de Casagrande avec un outil a rainuré et cale d'épaisseur.



**Figure 12** Etapes de l'essai de limite de liquidité

### II.3.4 Détermination de la limite de plasticité : $W_p$

1. Prendre un peu de matériau et former une petite boule.
2. Rouler à la main sur la plaque de marbre cette boule afin d'obtenir un bâtonnet. Trois cas peuvent se présenter :

- Le bâtonnet commence à se fissurer quand il atteint une longueur de 10 cm et un diamètre de 3 mm. Dans ce cas, le sol est à la limite de plasticité et il faut mesurer sa teneur en eau.

- 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.



**Figure 13 Détermination de la limite de plasticité :  $W_p$**

### **II.3.5 Calculs:**

La détermination des limites d'Atterberg permet de calculer deux paramètres.

Indice de plasticité  $I_p$  : Cet indice définit l'étendue du domaine plastique du sol entre les limites de liquidité et de plasticité

$$I_p = W_L - W_p$$

Indice de consistance  $I_c$  : Cet indice prend la teneur en eau  $W$  du sol à l'état naturel pour la fraction inférieure à 0.4mm

$$I_c = \frac{w_L - W}{I_p}$$

L'essai s'effectue en deux phases :

- I. Recherche de la limite de liquidité à l'aide de l'appareil de Casagrande ou le cône de pénétration.
2. Recherche de la limite de plasticité par formation de rouleaux de 3 mm de diamètre.

**Tableau 3 Indice de plasticité Ip**

Indice de plasticité Ip	Etat du sol
0-5	Non plastique
5-15	Plastique
15-40	Peu plastique
> 40	Très plastique

**Tableau 4 Ordre de grandeur**

Nature de sol	Valeur d'Ip
Argile	IP>30
Argile limoneuse	20<Ip<30
Limon	10<Ip<20
Sable argileux	5<Ip<20
Sable limoneux	5<Ip<15

**Tableau 5 Indice de consistance  $I_c$** 

Indice de consistance $I_c$	Etat du sol
$I_c > 1$	Solide
$0 > I_c > 1$	Plastique
$I_c < 0$	Liquide

#### II.4 ESSAI DU BLEU METHYLENE (NF P 94-068)

Couramment, l'essai au bleu de méthylène est utilisé pour caractériser l'activité de l'argile contenue dans les sols. Il est utilisé également pour quantifier de manière sûre et simple la propreté des granulats

On appelle valeur de bleu du granulat le nombre :

$$VB = V/Ms$$

Avec

**V** est le volume de la solution de bleu de méthylène injectée à la pris d'essai

**Ms** est la masse sèche de l'échantillon

##### II.4.1 But :

Evaluer l'influence des fines d'origine argileuses contenus dans les sables et graves d'origine naturelle ou artificielle.

##### II.4.2 Principe :

L'essai consiste à prélever du granulat un échantillon de la fraction granulométrique **0/2 mm** et d'injecter successivement des doses élémentaires d'une solution de bleu de méthylène dans un bain aqueux contenant l'échantillon. La capacité d'absorption correspond à la quantité totale de bleu introduite lorsqu'on est en présence d'un début d'excès.

### II.4.3 Matériels utilisés :

- Burette de contenance **50ml**
- Tige de verre
- Agitateur à ailettes de diamètre **70 à 80mm** et de vitesse de rotation **400 à 500** tours par minute au minimum
- baguette de verre de 8mm de diamètre et **300mm** de longueur
- Chronomètre
- Tamis de **0.08mm, 0.05mm** d'ouverture de maille.
- balance de précision 1cg
- Bécher de 3L

### Matières consommables :

- Solution de bleu de méthylène
- Papier filtre sans cendre
- Kaolinite
- eau distillée
- grave
- sable



Figure 14 détermination l'essai bleu méthylène (LTPE)

#### II.4.4 Mode opératoire :

1. Préparer l'échantillon : pour cela suivre les étapes suivantes :

- Prélever une masse  $M_h=300g$  de la fraction sableuse  $0/2mm$  du granulat à étudier.

- Déterminer la teneur en eau  $\omega$  de l'échantillon.

- Tamiser l'échantillon par voie humide sur un tamis de  $0.08mm$  surmonté par un tamis de décharge de  $0.5mm$ . Recueillir les eaux de lavage dans un bécher de 3L. le volume d'eau nécessaire au lavage doit être égal à environ 500ml

- Sécher les refus au tamis  $0.08mm$  et  $0.5mm$  puis peser : soit  $M$  la masse totale des refus. - Déterminer la masse réelle  $m_s$  des particules fines obtenues par lavage soumise à l'essai.

2. Introduire 30g de kaolinite séchée à  $105^\circ C$  (dont on connaît la valeur de bleu  $V_{bk}$ ) dans le bécher contenant les fines.

3. Brasser l'agitateur à ailettes à raison de 600 tours/minute pendant 5min puis de manière permanente à raison de 400 tours/minute

4. Effectuer le dosage au bleu de méthylène et le test de la tache en suivant la procédure indiquée au tableau ci-dessous. Le dosage consiste à injecter successivement des doses bien déterminées de bleu de méthylène dans la suspension de sol, jusqu'à atteindre la saturation des particules d'argile. Le test de tache permet de répéter l'instant de cette saturation : on prélève une goutte de liquide dans le bécher contenant le sol imbibé de bleu et on dépose celle-ci sur le papier filtre. Deux cas sont possibles :

- La goutte centrale bleue est entourée d'une zone humide incolore : le test est négatif.

- La goutte centrale bleue est entourée d'une zone teintée de bleu : le test est positif

## II.4.5 Calculs et expression des résultats

Les calculs à exécuter sont :

→ Teneur en eau de l'échantillon soumis à l'essai (0/5 mm) :

$$W = (m_{h1} - m_{s2}) / m_{s2}$$

→ Masse sèche de la prise d'essai :

$$m_0 = m_{h1} / (1 + w)$$

→ Masse de bleu introduite (solution à 10g/l) :

$$B = V \times 0.01$$

Pour les matériaux dont le D max. est inférieur à 5 mm, l'expression du résultat est:

$$VBS = B / m_0 \times C \times 100$$

**VBS** : est exprimée en grammes de bleu pour 100 g de matériaux sec.

**C** : étant la proportion de la fraction 0/5 mm dans la fraction 0/50 mm du matériau sec.

## II.4.6 Classification des sols d'après l'essai au bleu de méthylène

Le GTR retient 6 seuils:

→ VBS = 0.1 : Sol insensible à l'eau ;

→ VBS 0.2 : Apparition de la sensibilité à l'eau,

→ VBS = 1.5 : Seuil distinguant les sols sablo-limoneux des sols sablo-argileux,

→ VBS = 2.5 : Seuil distinguant les sols limoneux peu plastique des sols limoneux de plasticité moyenne ;

→ VBS = 6 : Seuil distinguant les sols limoneux des sols argileux,

→ VBS = 8 : Seuil distinguant les sols argileux des sols très argileux.

## II.2 ESSAIS MECANIQUES

### II.2.1 ESSAI PROCTOR (NF P94-093)

#### A. But de l'essai

L'essai Proctor a pour but de déterminer la teneur en eau optimale pour un sol de remblai donné et des conditions de compactage fixées, qui conduit au meilleur compactage possible ou encore capacité portante maximale.

#### B. Principe de la méthode

Le principe de ces essais consiste à humidifier un matériau à plusieurs teneurs en eau et à le compacter, Pour chacune des teneurs en eau, selon un procédé et une énergie conventionnels. Pour chacune des valeurs de teneur en eau considérées, on détermine la masse volumique sèche du matériau et on trace la courbe des variations de cette masse volumique en fonction de la teneur en eau.

D'une manière générale cette courbe, appelée courbe Proctor, présente une valeur maximale de la masse volumique du matériau sec qui est obtenue pour une valeur particulière de la teneur en eau. Ce sont ces deux valeurs qui sont appelées caractéristiques optimales de compactage Proctor normal ou modifié suivant l'essai réalisé

-**Le moule Proctor** : diamètre intérieur du moule = 101,6 mm / H = 117 mm (sans rehausse) = V moule Proctor = 948 cm<sup>3</sup>.

-**Le moule CBR** : diamètre du moule = 152 mm / H = 152 mm (sans rehausse) dont disque d'espacement de 25,4 mm d'épaisseur, soit une hauteur H utile = 126,6 mm = V moule CBR = 2 296 cm<sup>3</sup>.

-Avec chacun de ces moules, on peut effectuer deux types d'essai (choix par rapport à l'énergie de compactage) ;

- L'essai Proctor normal.
- L'essai Proctor modifié.

#### C. Appareillage

✓ Moule CBR (éventuellement Proctor) ;

✓ Dame Proctor normal ou modifié .

- ✓ Règle à araser ;
- ✓ Disque d'espacement ;
- ✓ Bacs d'homogénéisation pour préparation du matériau,
  - ✓ Tamis 5 et 20 mm (contrôle et écrêtage le cas échéant de l'échantillon) ;
  - ✓ Truelle, spatule, pinceau, etc... ;
  - ✓ Eprovette graduée 150 ml environ ;
- ✓ Petits récipients (mesures des teneurs en eau) ;
- ✓ Balance portée 20 kg, précision  $\pm 5$  g ;
  - ✓ Balance de précision 200 g, précision  $\pm 0,1$  g ;
  - ✓ Etuve  $105^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$
  - ✓ Burette à huile.

#### **D. Mode opératoire**

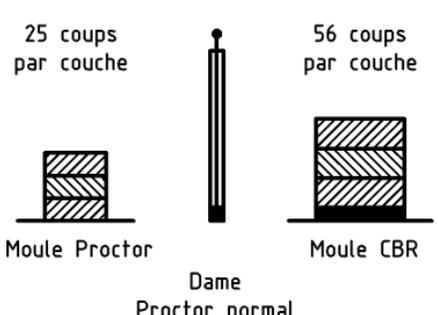
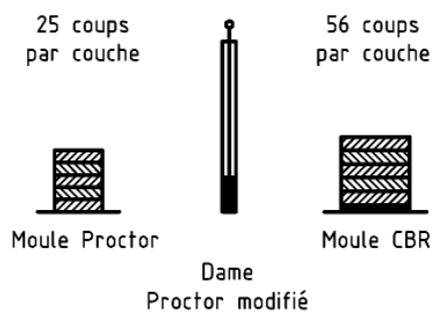
→ La réalisation de la courbe nécessitera au moins 5 ou 3 essais (1 point (o ;  $\gamma_d$ ) par essai).

##### **• Préparation de l'échantillon**

1. préparer une prise de 15 à 100 kg selon la granularité du matériau et suivant les caractéristiques du compactage
2. Sécher le matériau à l'air ou à l'étuve réglée à  $50^{\circ}\text{C}$
3.  $D_{\text{max}}$  est inférieur à 20 mm la totalité du sol s'apprête à l'essai
4. si le sol contient des éléments à 20 dans une proportion inférieure 30 % un écrêtage est alors réalisé et le sol s'apprête à l'essai sur les inférieurs à 20 mm Et seul le tamisât est conservé
5. si le sol contient des éléments sup à 20 mm dans une proportion 30% l'essai n'est pas validé
6. après séchage le matériel et tamise 20 mm et seul le tamisât est conservé

7. homogénéiser et diviser par appréciation le matériau Au moins en cinq parts égales
  8. humidifier et malaxer chaque part dans un bac a des teneurs en eau différentes
  9. chaque part est conservée dans une boite ou un sac hermétique
  - 10-introduire le matériau dans un moule CBR ou moule Proctor suivant sa granulométrie en prenant soin de mettre un papier filtre et le disque d'espacement lorsqu'il est utilise
  11. compacter chaque couche avec la dame correspondante en appliquant 25 ou 56 coups suivant l'essai programme répéter l'opération avec les autres parts
  12. retirer la rehausse et araser soigneusement à niveau du moule puis peser l'ensemble du moule avec le matériau
  13. démouler l'éprouvette et prélever un chantillon représentatif pour la teneur en eau
  14. calculer la teneur en eau et la masse volumique sèche pour chaque éprouvette compactée 15-tracer la courbe représentant la masse volumique sèche en fonction de la teneur en eau (2% de w pour 0,1 T/m<sup>3</sup> de pd)
- **Choix du type de moule**

**Tableau 6 Modalités d'exécution des essais Proctor normal et modifié**

Nature de l'essai	Caractéristiques de l'essai	Moule Proctor	Moule CBR	Schéma récapitulatif
Essai Proctor normal	Masse de la dame	2 490 g	2 490 g	<p>3 couches, à raison de :</p> <p>25 coups par couche      56 coups par couche</p>  <p>Moule Proctor      Dame Proctor normal      Moule CBR</p>
	Diamètre du mouton	51 mm	51 mm	
	Hauteur de chute	305 mm	305 mm	
	Nombre de couches	3	3	
	Nombre de coups par couche	25	56	
Essai Proctor modifié	Masse de la dame	4 535 g	4 535 g	<p>5 couches, à raison de :</p> <p>25 coups par couche      56 coups par couche</p>  <p>Moule Proctor      Dame Proctor modifié      Moule CBR</p>
	Diamètre du mouton	51 mm	51 mm	
	Hauteur de chute	457 mm	457 mm	
	Nombre de couches	5	5	
	Nombre de coups par couche	25	56	

### E. les calcule

Traces la courbe  $\gamma_d = f(\omega)$  avec pour points de la courbe les coordonnées suivantes pour chaque point ;

$$\gamma_d = (P_2 - P_1) / (1 + \omega) \times \text{Volume}$$

$\omega$  ; teneur en eau en %

$\gamma_{dopt}$  ; en  $t/m^3$

## II.2.2 Essai de résistance à la traction indirecte (Essai brésilien) et La résistance à la compression (NF EN 12390-6)

- **Principe**

Une éprouvette cylindrique est soumise sur toute sa génératrice à un effort de compression appliqué sur zone étroite. Les contraintes de la traction orthogonales qui en résultent provoquent la rupture de l'éprouvette par traction indirecte.

### Appareillage

- Presse CBR •
- Gabarit de centrage : il permet de positionner l'éprouvette et les bandes de chargement il ne doit pas s'opposer à la déformation de l'éprouvette au cours de l'essai ;
- Bandes de chargement ;
- Un matériau dur d'une longueur supérieure à la longueur de la ligne de contact avec l'éprouvette.

- **Mode opératoire**

#### A. Préparation de l'éprouvette :

Les éprouvettes Rtb ont été préparées de la même manière que celles de l'essai de résistance à la compression simple.

#### B. Positionnement de l'éprouvette :

- Centrer l'éprouvette dans la machine, éventuellement au moyen d'un gabarit de centrage. -Positionner soigneusement les bandes de chargement et les pièces d'appui, le cas échéant, le long des parties supérieure et inférieure du plan de chargement de l'éprouvette
- S'assurer que le plateau supérieur est parallèle au plateau inférieur au cours de la mise en charge.

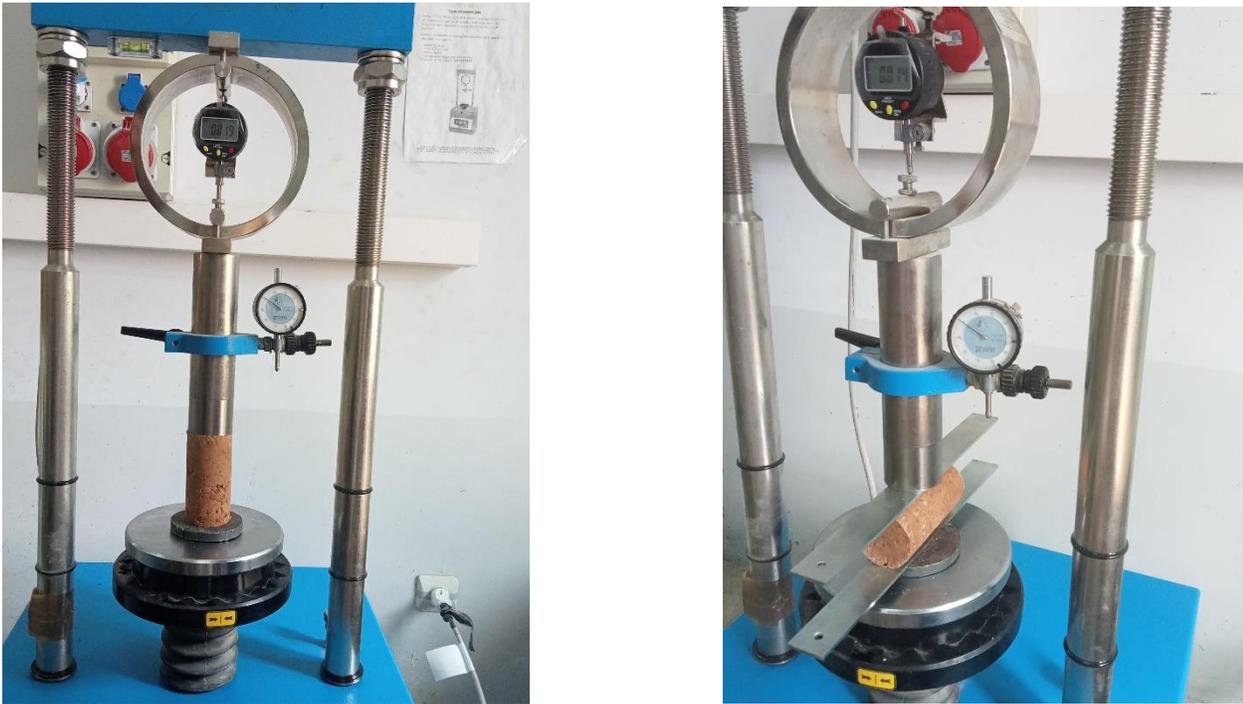


Figure 15 essai brésilien

### Expression des résultats

La résistance à la traction indirecte est La résistance à la traction simple calculée par la formule suivante.

$$R_{tb} = 2F / \pi HD, \quad R_c = F/S$$

Avec ;

**R<sub>c</sub>** : Résistance à la traction simple, exprimée en (bar)

**R<sub>tb</sub>** : Résistance à la traction indirecte, exprimée en (bar).

**F** : force maximale à la rupture, exprimée en (kgf).

**H** : La longueur de l'éprouvette, exprimée en (m).

**D** : Le diamètre de l'éprouvette, exprimée en (m).



# Chapitre II

## CARACTERISATION DES TUF ETUDIE

## I. Introduction:

Après l'étude théorique des tufs dans le chapitre précédent (chapitre I), on va entamer l'étude d'identification du tuf de la carrière de KHELIL. Nous nous intéressons dans ce deuxième chapitre à l'étude d'identification géotechnique des matériaux: tuf à l'aide des essais de laboratoire classique.

**Tableau 7 Essais d'identification.**

<b>L'ESSAI</b>	<b>NORME</b>
Teneur en eau	NF P 94-050
Analyse granulométrique Par tamisage	NF P 94-056
Analyse granulométrique Par sédimentation	NF P 94-057
Limites d'Atterberg	NF P 94-051
Proctor Modifié	NF P 94-093
VBS	NF P 94-068

### Situation géographique de la zone d'étude ;

Bordj Bou Arreridj est situé dans la région des Hauts Plateaux, à 240 km à l'est d'Alger. Il se caractérise par un climat méditerranéen semi-aride, avec des températures chaudes en été et très froides en hiver. Les précipitations annuelles se situent entre 300 et 600 mm (ANRH, 2003).

## II.1 Localisation des échantillons:

### II.1.1 Carrière tuf (khelil) :.

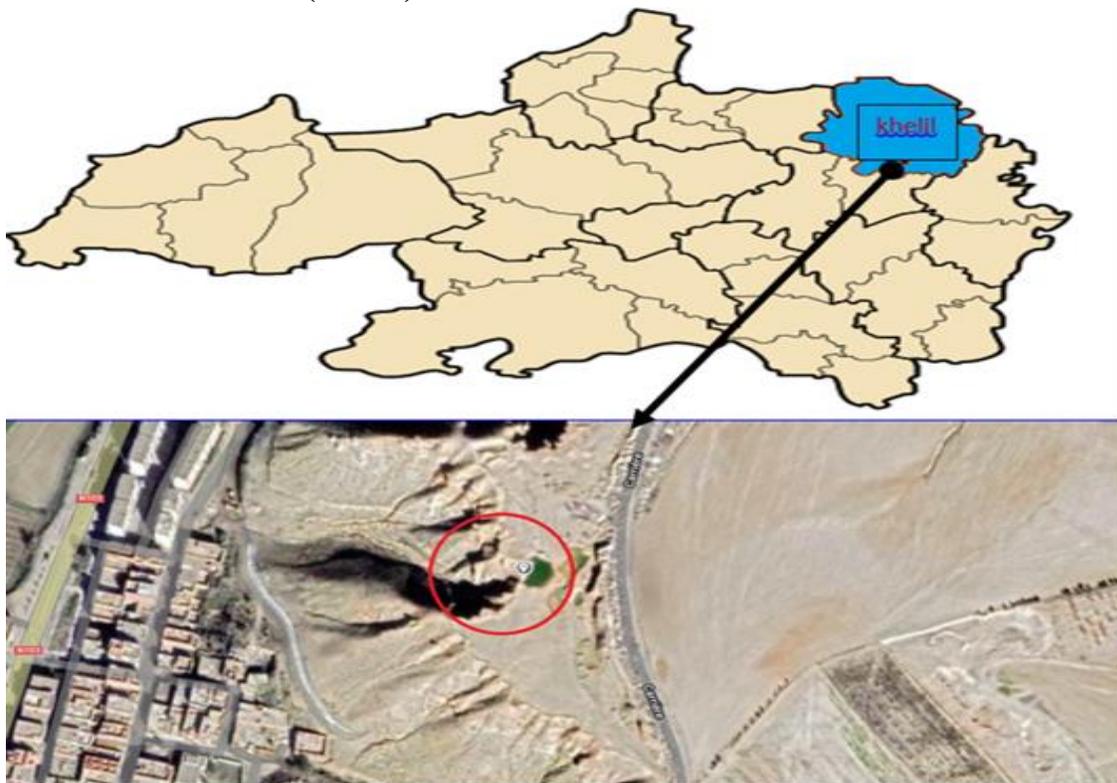


Figure 16 Carte de localisation de la carrière étudiée (tuf)

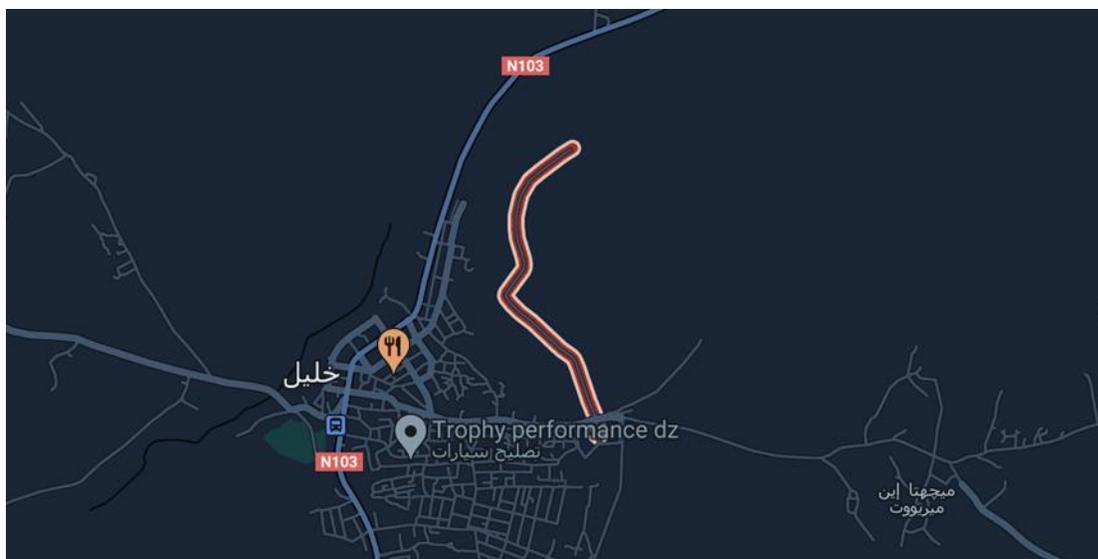


Figure 17 localisation de la carrière de tuf khelil

### II.1.2 Tuf de khelil

La commune de Khelil est située dans la région des Hauts-Plateaux, entre les monts des Bibans au nord et la chaîne du Hodnaau sud. Elle se trouve à 27 km au l'est de Bordj Bou Arreridj, 33 km à l'ouest de Sétif et 270 km au sud-est d'Alger. Les coordonnées géographiques du gîte de prélèvements sont les suivantes.

- Latitude : **4006795 m N**
- Longitude : **682991 m E;**



- Altitude : **930 m**

**Figure 18** prélèvement des échantillons

## Mode de prélèvement

### III.1 Etude d'identification des matériaux utilisés

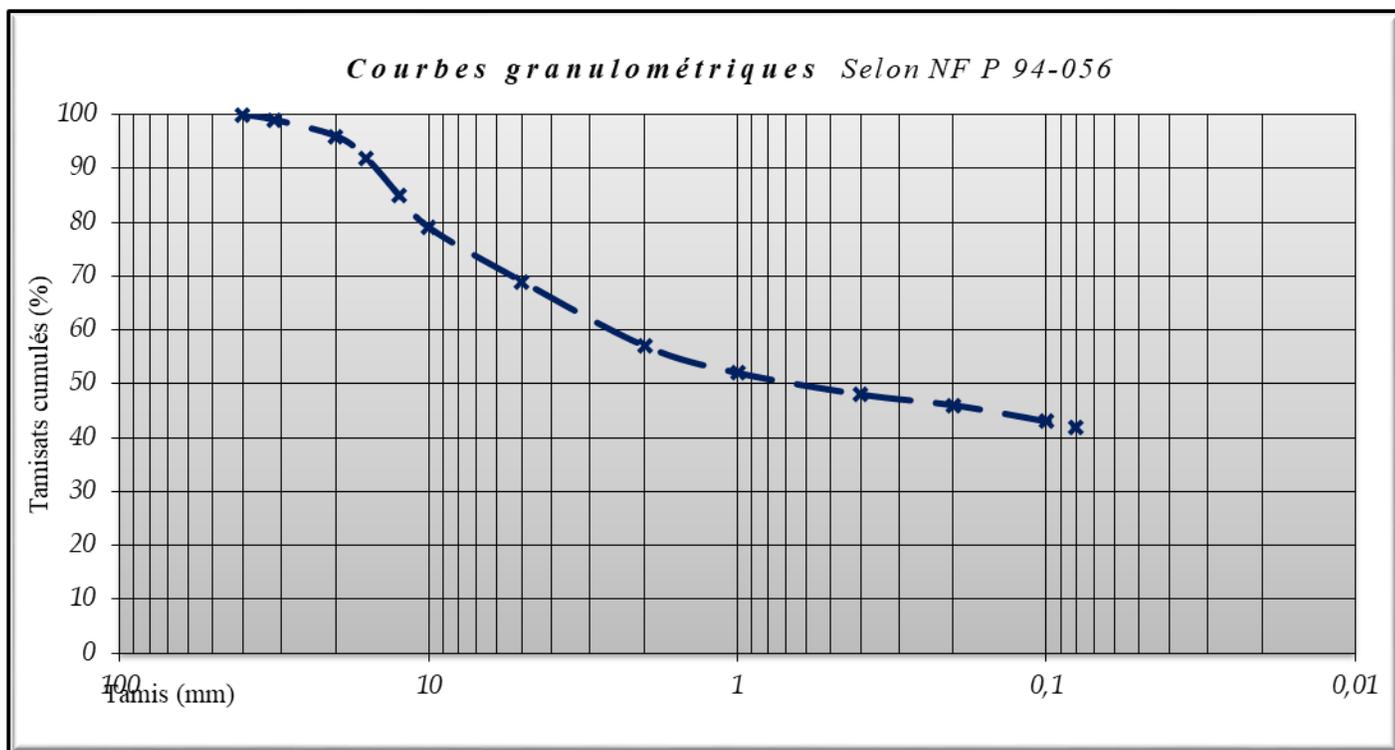
**Tableau 8 résume les résultats des essais physique-mécaniques et chimiques (khelil)**

Provenance:		KHELIL		Date de prélèvement:	03/04/2022
Analyse Granulométrique		Essais		Valeur	Norme d'essai
<b>NFP 94-056</b>		<b>Teneur en Eau</b>	Wn%	18.75	<b>NFP 94-050</b>
40	100	<b>Limite de Liquidité</b>	WL%	42.31	<b>NFP 94-051</b>
31.5	99	<b>Limite de Plasticité</b>	Wp%	21.68	<b>NFP 94-051</b>
20	96	<b>Indice de Consistance</b>	Ip%	19.63	<b>NFP 94-051</b>
16	92				
12.5	85	<b>Valeur de Bleu</b>	VBS	3.33	<b>NFP 94-068</b>
10	79	<b>Analyse granulométrique</b>	P à 31.5mm %	99	<b>NFP 94-056</b>
5	69		P à 5 mm %	69	
2	57		P à 2 mm %	57	
1	52		P à 80 µm %	42	
0.4	48				
0.2	46	<b>Essai Proctor modifié sur la fraction 0/20 mm</b>	WOPM t/m <sup>3</sup>	10	<b>NFP 94-093</b>
0.1	43		γdOPM%	1.93	
0.08	42				
<b>Classification GTR</b>		<b>Essai Proctor modifié sur la fraction 0/10 mm</b>	WOPM t/m <sup>3</sup>	12	<b>NFP 94-093</b>
SOL			γdOPM%	1.98	
A <sub>2</sub>		<b>Analyses chimiques</b>	CaCO <sub>3</sub> %	67.28	<b>NFP 94-048</b>
			SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> %	néant	

### III.1.1 Analyse granulométrique par tamisage :

**Tableau 9 Résultats de l'analyse granulométrique**

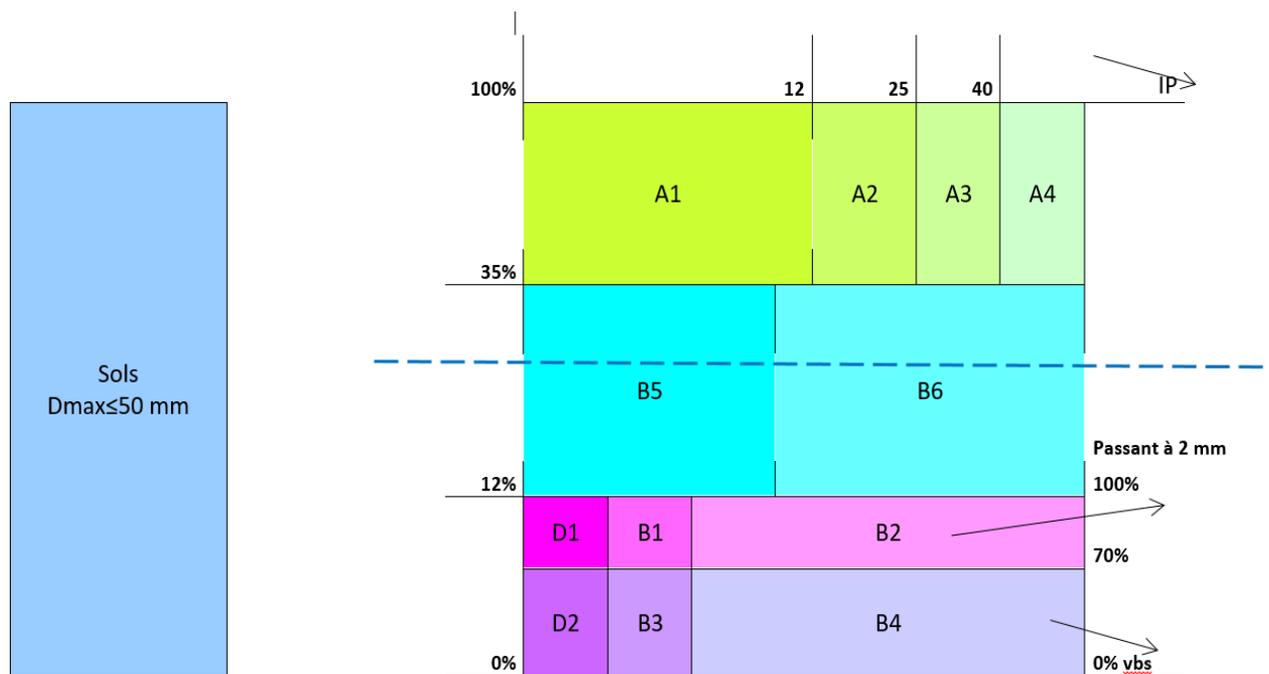
GRANULOMETRIE					
Prise d'essai		Partage au tamis dc			
dm (mm)=	31.5	Tamis dc (mm):		10	
Masse: m (g)=	8000	Masse sèche du refus au tamis dc: Rc=		1636.77	
		Masse passant au tamis dc: mh=		6363	
Tamisât au tamis dc					
Part 1 (Teneur en eau)			Part 2 (Tamisage)		
Masse humide: mh1 (g) =	1000	Masse humide: mh2 (g) =	2000		
Masse sèche: ms1 (g) =	996	Masse sèche: ms2 (g) =	945		
Masse sèche totale: ms (g) =				7974	
Coef multiplicateur sur refus au tamis 80 µ: b=				3.18	
Tamis (mm)	Masse refus mesurés (g)		Masse refus R cumulé en g	Pourcentage massique	
	Ri	R	R	Refus cumulé r	Tamisât cumulé p
31.5	0	61.54	61.54	0.77	99
20	0	252.66	314.2	3.94	96
16	0	306.63	620.83	7.78	92
12.5	0	579.24	1200.07	15.04	85
10		436.7	1636.77	20.52	79
5	265.45	0	2480.8	31.11	69
2	289.7	0	3402.1	42.66	57
1	123.08	0	3793.49	47.57	52
0.4	93.59	0	4091.10	51.3	48
0.2	60.62	0	4283.87	53.72	46
0.1	80.7	0	4540.49	56.9	43
0.08	25.63	0	4621.99	57.69	42



**Figure 19** Courbe granulométrique par tamisage

**Classification sol ;**

Le tuf de khelil et âpre la courbe granulométrique ; le diamètre maximum des granulats est de 31.5 de particules fines (passant à 80µm) et lourder de 42 %



**Figure 20** Tableau synoptique de classification des matériaux selon leur nature (d'après GTR 2002)

**III.1.2 Analyse granulométrique par sédimentation**

Tempe	R Lecture densimètre	Température	C <sub>t</sub> Correction température	P% sur tamis à 80μ	P% sur tamis a 50 mm	D (μm)
30 S	2022.5	18.6	0.975	93.9	39	65
1 min	2022	/	/	91.9	38	55
2 min	2020	/	/	83.9	35	35
5 min	2018	/	/	75.9	32	25
10 min	2015.5	/	/	65.9	28	17
20 min	2011.5	/	/	49.9	21	12
40 min	2000	/	/	3.9	2	9
80 min	2000	/	/	3.9	2	7
4 h	2000	19.3	1.075	4.3	2	3.9
4 h	2000	18.6	1	4	2	1

Pourcentage < 80 μm = 42 %

### III.1.3 Les limites d'Atterberg:

**Tableau 10 Résultats des limites d'Atterberg**

Limite de liquidité								
	Essai 1		Essai 2		Essai 3		Essai 4	
N. de coups	15		25		35			
No Tare	A9	D51	C15	C5	A11	C4		
P.humide+tare	25.8	25.52	24.23	29.03	28.51	27.4	0.	0.
P.sec+tare	23.32	23.15	22.34	25.78	25.44	24.7	0.	0.
P.de la tare	17.68	17.67	17.77	17.88	17.57	17.81	0.	0.
P.de l'eau	2.48	2.37	1.89	3.25	3.07	2.7	0.	0.
P.sol sec	5.64	5.48	4.57	7.9	7.87	6.89	0.	0.
Teneur en eau	43.97	43.25	41.36	41.14	39.01	39.19		
Moyenne	43.61		41.25		39.1			
<input type="button" value="Effacer"/>								
Limite de plasticité								
	Essai 1		Essai 2		Essai 3		Essai 4	
No de la tare	B23		B25		B31		D23	
P.sol humide+tare	7.10		7.06		7.48		7.01	
P.sol sec+tare	7.01		6.97		7.37		6.93	
P.de la tare	6.55		6.60		6.82		6.58	
P.de l'eau	0.09		0.09		0.11		0.08	
P.du sol sec	0.46		0.37		0.55		0.35	
Teneur en eau	19.57		24.32		20.		22.86	
Moyenne	19.57		24.32		20.		22.86	

**Tableau 11 Résultats des limites de liquidité**

	Essai 1	Essai 2	Essai 3
N	15	25	35
WL	43.61	41.25	39.1

**Tableau 12 Résultant des limites de plasticités**

	Essai 1	Essai 2	Essai 3	Essai 3
Wp	19.57	24.32	20	22.86

$W_L = a \times \text{Log}(25) + B$   
 Résultats  $W_L = 41.014$   
 $W_p = 21.297$   
 $I_p = 19.717$

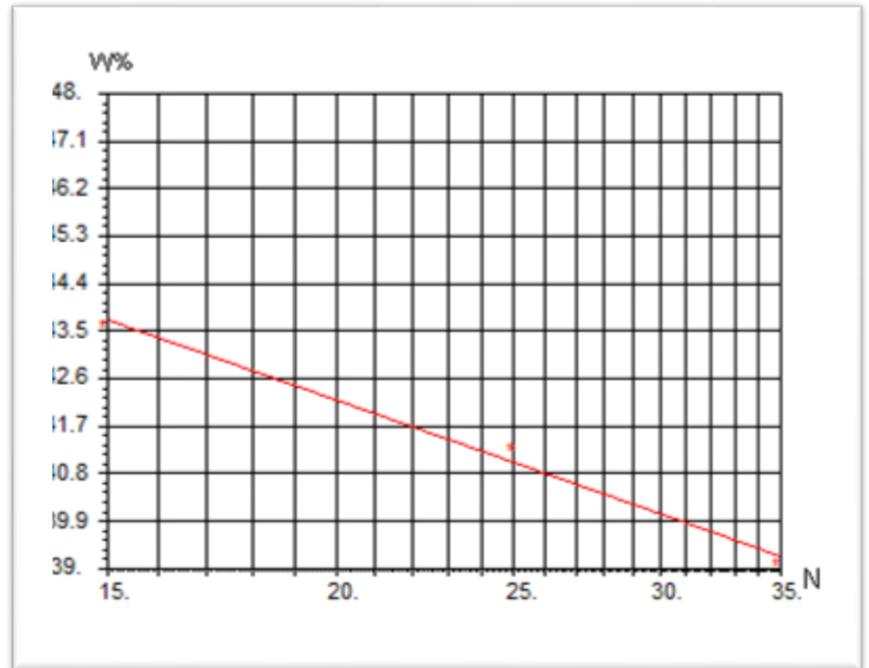


Figure 21 Courbe des limites d'Atterberg

$W_L = a \times \text{Log}(25) + B$   
 Résultats  $W_L = 41.014$   
 $W_p = 21.297$   
 $I_p = 19.717$

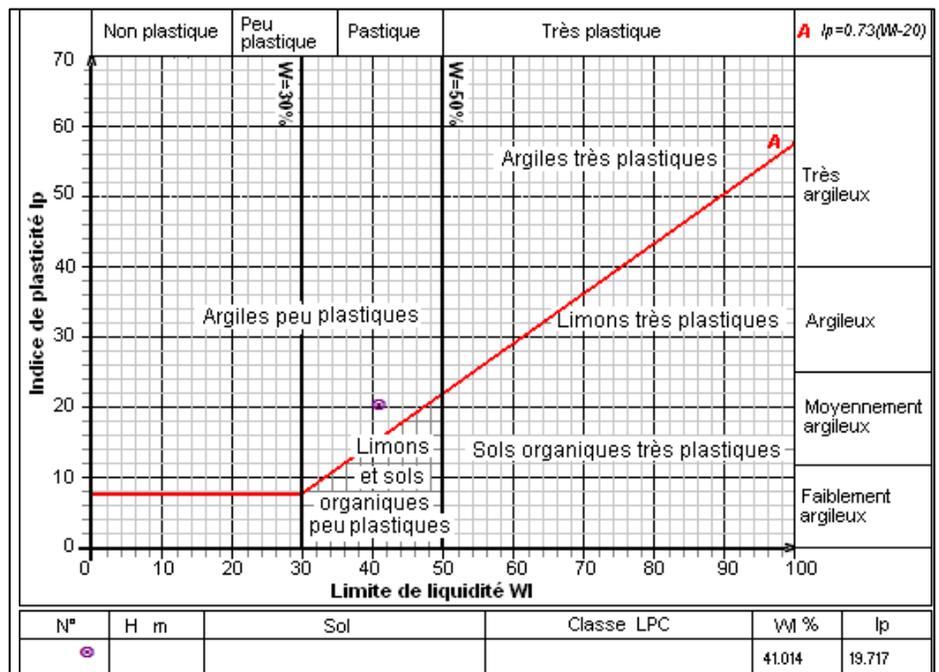


Figure 22 La Courbe de classification des limites d'Atterberg

### III.1.4 Essai au bleu de Méthylène :

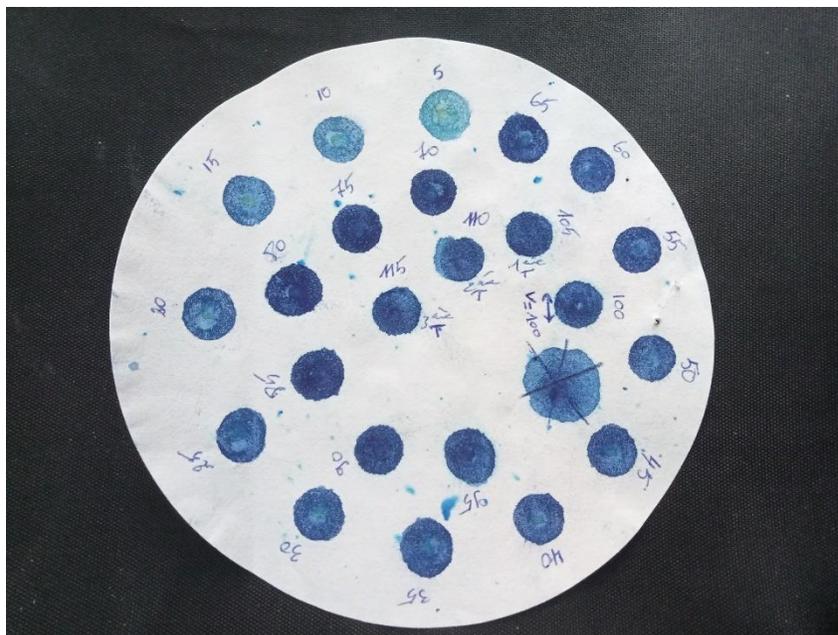


Figure 22 Essai au bleu de Méthylène

Tableau 12 Valeur au bleu de méthylène

bleu de méthylène			
Masse humide de la 1ère prise d'essai:	mh1	/	g
Masse humide de la 2ème prise d'essai:	mh2	/	g
Masse sèche de la 2ème prise d'essai:	ms2	/	g
Proportion pondérale:	C	/	%
Teneur en eau:	w	/	%
Masse sèche de la prise d'essai:	m0	<b>30</b>	g
Volume de bleu introduit:	V	<b>100</b>	cm <sup>3</sup>
Masse de bleu introduite:	B	<b>1</b>	cm <sup>3</sup>
Diamètre max du sol:	Dmax	<b>80</b>	mm
Valeur au bleu:	VBS	<b>0.033</b>	g/100g

### III.1.5 Essai Proctor modifié

**Tableau 13 Valeur d'essai Proctor modifié**

<b>masse volumique sèche</b>			
	point 1	point 2	point 3
eau ajoutée	8%	10%	14%
masse totale humide	<b>10240</b>	<b>10300</b>	<b>101260</b>
masse du moule vide	<b>5340</b>	<b>5340</b>	<b>5340</b>
masse du sol humide	4900	4960	4920
masse volumique humide	2.13	2.16	2.14
volume du moule	<b>2295</b>	<b>2295</b>	<b>2295</b>
masse volumique sèche	1.91	1.93	1.90

<b>teneurs en eau</b>						
TARE	M	H	Z	G	N	X
masse totale humide	59.85	78.13	57.3	68.93	52.67	69.37
masse totale sèche	55.13	71.73	52.77	62.78	48.16	63.23
tare	12.75	12.84	12.93	12.98	12.92	13.1
masse de l'eau	4.72	6.4	4.53	6.15	4.51	6.14
masse du sol sec	42.38	58.89	39.84	49.8	35.24	50.13
teneur en eau	11.14	10.87	11.37	12.35	12.80	12.25
Moyenne	11.00		11.86		12.52	

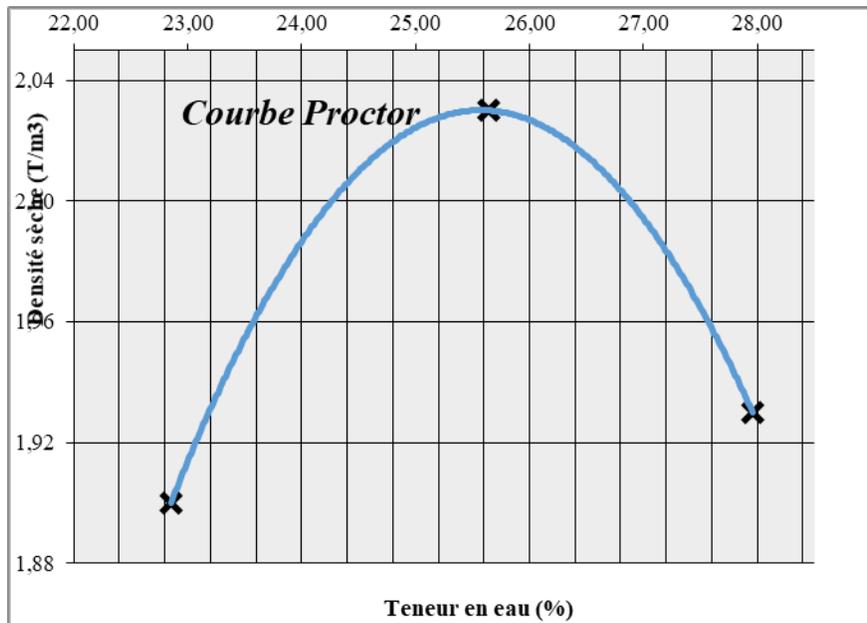


Figure 23 courbe D'essai Proctor modifiée

### Conclusion ;

Les essais réalisés nous ont permis de conclure que :

Le tuf de Khelil est un matériau essentiellement composé de calcaire ( $\text{CaCO}_3 = 67,28\%$ ), Il présente une courbe granulométrique étalée. Le pourcentage des éléments inférieurs à 0,08 mm est de l'ordre de 42,31%.

Selon le GTR (Guide des terrassements routier), le tuf de khelil est classé dans la classe A2.



# Chapitre III

## VALORISATION DES TUF ETUDIE

## I. Introduction

Dans le chapitre précédent, nous avons procédé à une identification géotechnique des tufs calcaires, permettant de les classer et d'identifier leur utilisation potentielle dans la construction routière.

L'objectif de cette partie est de présenter une synthèse des connaissances, relatives à la technique de traitement des tufs calcaires de la région de Khelil avec la poudre de marbre.

Malgré certaines caractéristiques géotechniques médiocres au regard de la réglementation en vigueur, le tuf a la propriété particulière de durcir avec l'âge. Afin d'améliorer sa compacité, nous avons opté pour une correction de sa granulométrie en substituant le tuf avec une fraction de x% de poudre de marbre variant de 10 à 20%.

Pour connaître la composition optimale du mélange, des tests de compression simple et de traction indirecte ont été effectués sur différents mélanges à différents âges sur des éprouvettes fabriquées et compactées selon les caractéristiques de l'optimum Proctor modifié.

## II. Traitement des tufs par la poudre de marbre

Le tuf étudié est celui de khelil a les caractéristiques physiques présentées dans le chapitre 2.

### II.1 Préparation du matériau:

Le matériau séché à l'étuve à 105°C, Il est imbibé à une teneur en eau égale à la teneur en eau de l'optimum Proctor Normal,

La masse d'échantillon pour une éprouvette (Prise d'essai) est en fonction du volume de moule et la densité sèche à l'optimum.

$$M = \gamma_{dopm} \times V$$

L'étude des caractéristiques mécaniques a été réalisée pour les trois finesses de poudre de marbre suivantes ;

- 1<sup>er</sup> finesse correspond à 9 heures de broyage 10%-15%-20%
- 2<sup>ém</sup> finesse co7 heur de broyage 10%-15%-20%

- 3<sup>ém</sup> finesse 5 heur de broyage 10%-15%-20%

### Mode opératoire:

- Moule :
- diamètre = 5cm ;
- hauteur = 10cm ;
- volume = 196.34 cm<sup>3</sup>
- Extracteur ;
- Dispositif de compression (Presse à béton);



- Dispositif d'écrasement

**Figure 24 Matériels utilisés**

- **Références de compactage**

- La confection des éprouvettes pour les essais de résistance à la compression simple et à la traction indirecte se fait en exploitant les valeurs ( $Y_{dopm}$ ,  $W_{opm}$ ) de l'essai Proctor modifié sur la fraction 0/10 mm

### II.3 Préparation des mélanges et conservation des éprouvettes

Une étude en laboratoire a été réalisée avec les formules suivantes.

- Tuf avec ;10%-15%-20% de fines de poudre de marbre [en pourcentages du poids sec de tuf]
- Les délais de conservation des éprouvettes sont :



## II.4 Expression des résultats :

La résistance à la traction indirecte est calculée par la formule suivante :

$$R_{tb} = 2f / \pi h d$$

Avec:

- **R<sub>tb</sub>** Résistance à la traction indirecte, exprimée en (bar) ;
- **F**: Force maximale à la rupture, exprimée en (kN) ;
- **H**: La longueur de l'éprouvette, exprimée en (m) ;
- **D**: Le diamètre de l'éprouvette, exprimé en (m).

La résistance à la compression ;

$$R_c = F/S$$

Avec:

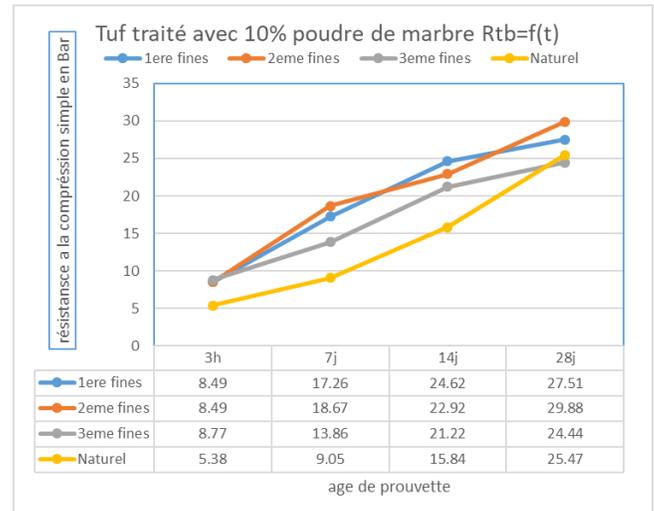
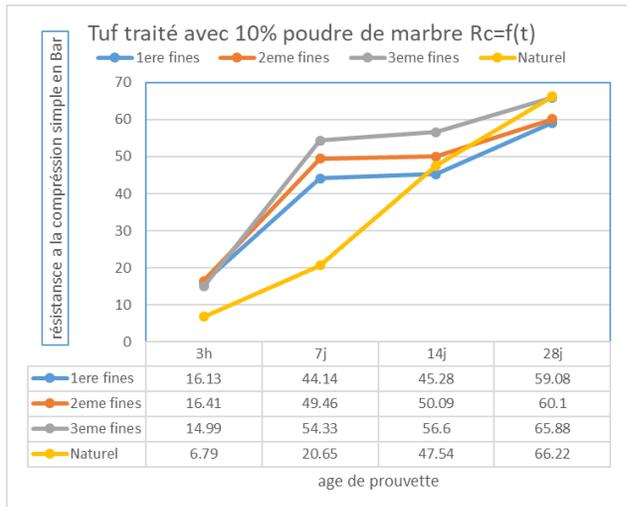
- **R<sub>c</sub>**: Résistance à la compression simple, exprimée en (bar) ;
- **F** : Force maximale à la rupture, exprimée en (kgf) ;
- **S** : Surface de l'éprouvette, exprimée en (cm<sup>2</sup>).

## III. RESULTATS ET INTERPRETATIONS ; est calculée par la formule suivante

### 3.1 Essais de résistance à la compression simple et à la traction indirecte

3.1.1. Evaluation de la résistance à la compression simple et à la traction indirecte en fonction du temps :

**A. Tuf traité avec 10% poudre de marbre**



**Figure 27 traité avec 10% poudre de marbre**

**Pour un dosage de 10 % (figure 28)**

La courbe représente les changements de résistance à la compression simple à la selon l'âge de l'éprouvette

- Plus la durée de vie de l'éprouvette augmente la résistance à la compression simple par rapport à tuf naturelle

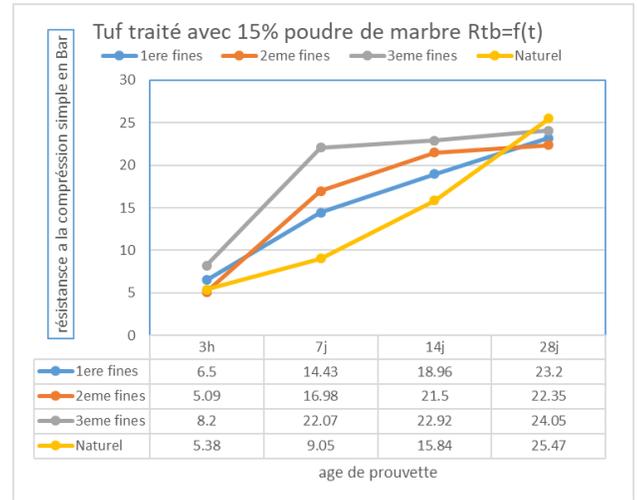
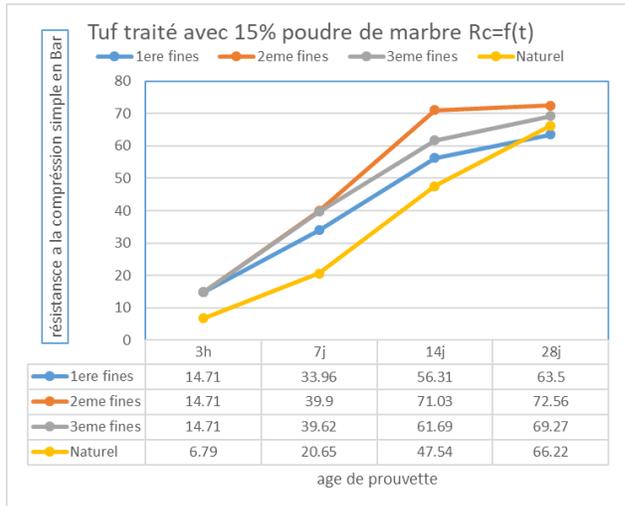
La résistance (RC) est sensiblement la même pour les échantillons 1ers et la 2ème finesse.

Pour le cas de 3ème finesse, la résistance à la compression simple a augmenté un peu par rapport les premiers et deuxièmes échantillons.

Pour le mélange traité c'est finalement le critère RC à 28 jours qui est le plus important.

De ce fait, le 3ème finesse présente la meilleure valeur (RC à 28 jours) comparativement avec les deux autres finesses.

**B. Tuf traité avec 15% poudre de marbre ;**



**Figure 28 traité avec 15% poudre de marbre**

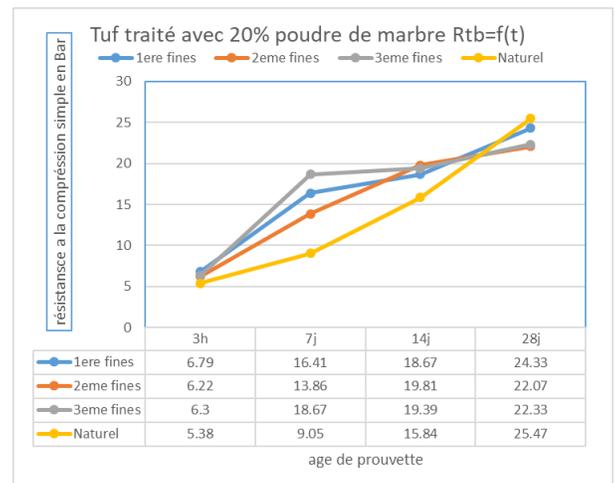
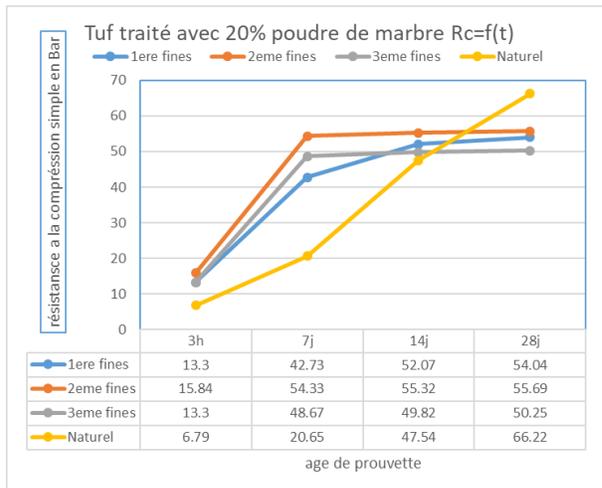
**Pour un dosage 15%(figure 29)**

La courbe représente les changements de résistance à la compression simple à la selon l'âge de l'éprouvette

Nous remarquons un changement dans la deuxième finesse par rapport au premier. Tout ce qui nous intéresse est (RC a 28).

Le 2ème finesse présente la meilleure valeur (RC à 28 jours) comparativement avec les deux autres finesses est tuf naturel.

**C. Tuf traité avec 20% poudre de marbre ;**



**Figure 29 traité avec 20% poudre de marbre**

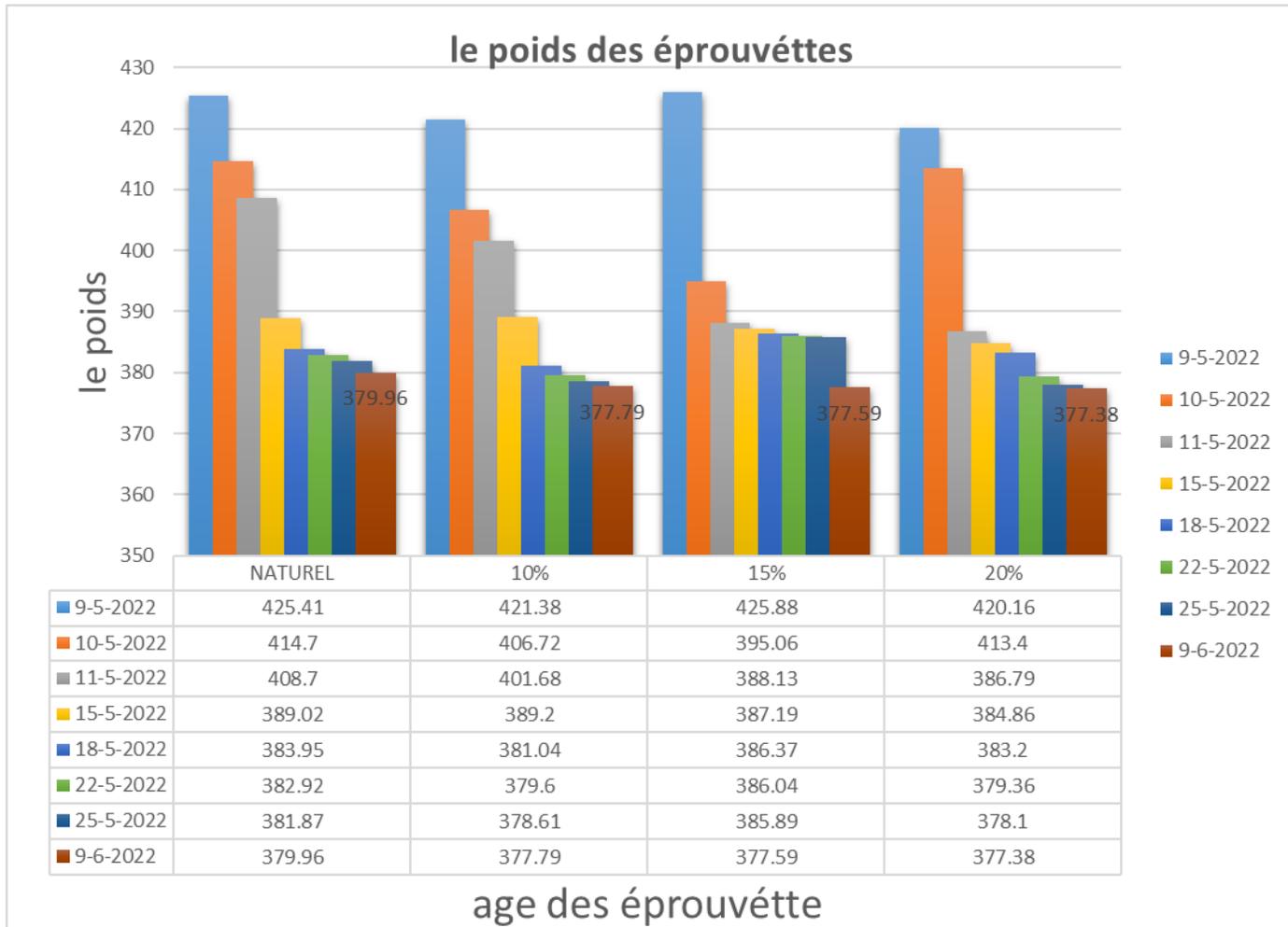
**Pour un dosage 20%(figure 30)**

La courbe représente les changements de résistance à la compression simple à la selon l'âge de l'éprouvette.

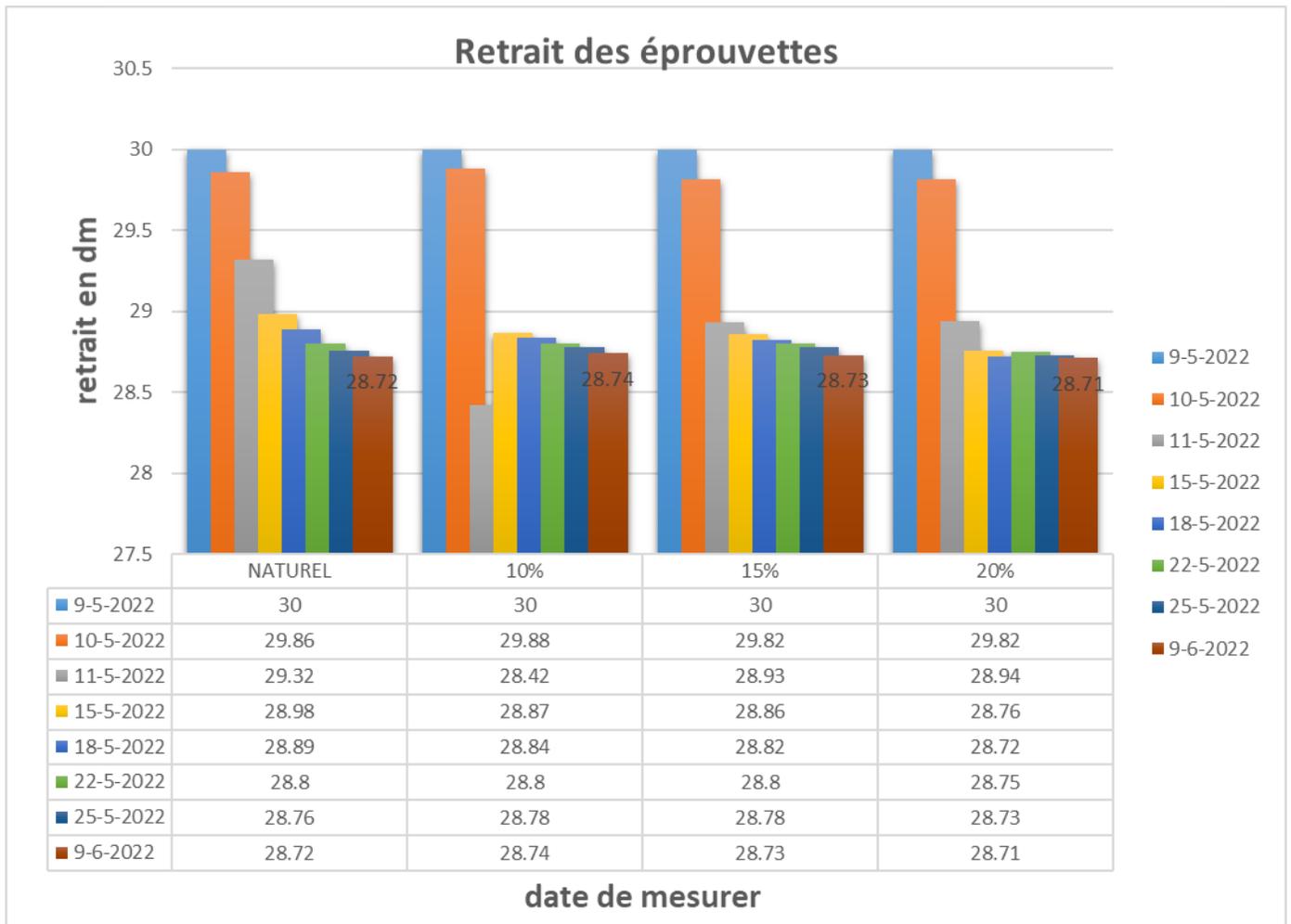
Nous remarquons un changement dans les trois finesses par rapport au tuf naturel. Tout ce qui nous intéresse est (RC a 28)

Le tuf naturel présente la meilleure valeur (RC à 28 jours) comparativement avec les trois finesses

### 3.1.2 Le poids des éprouvettes



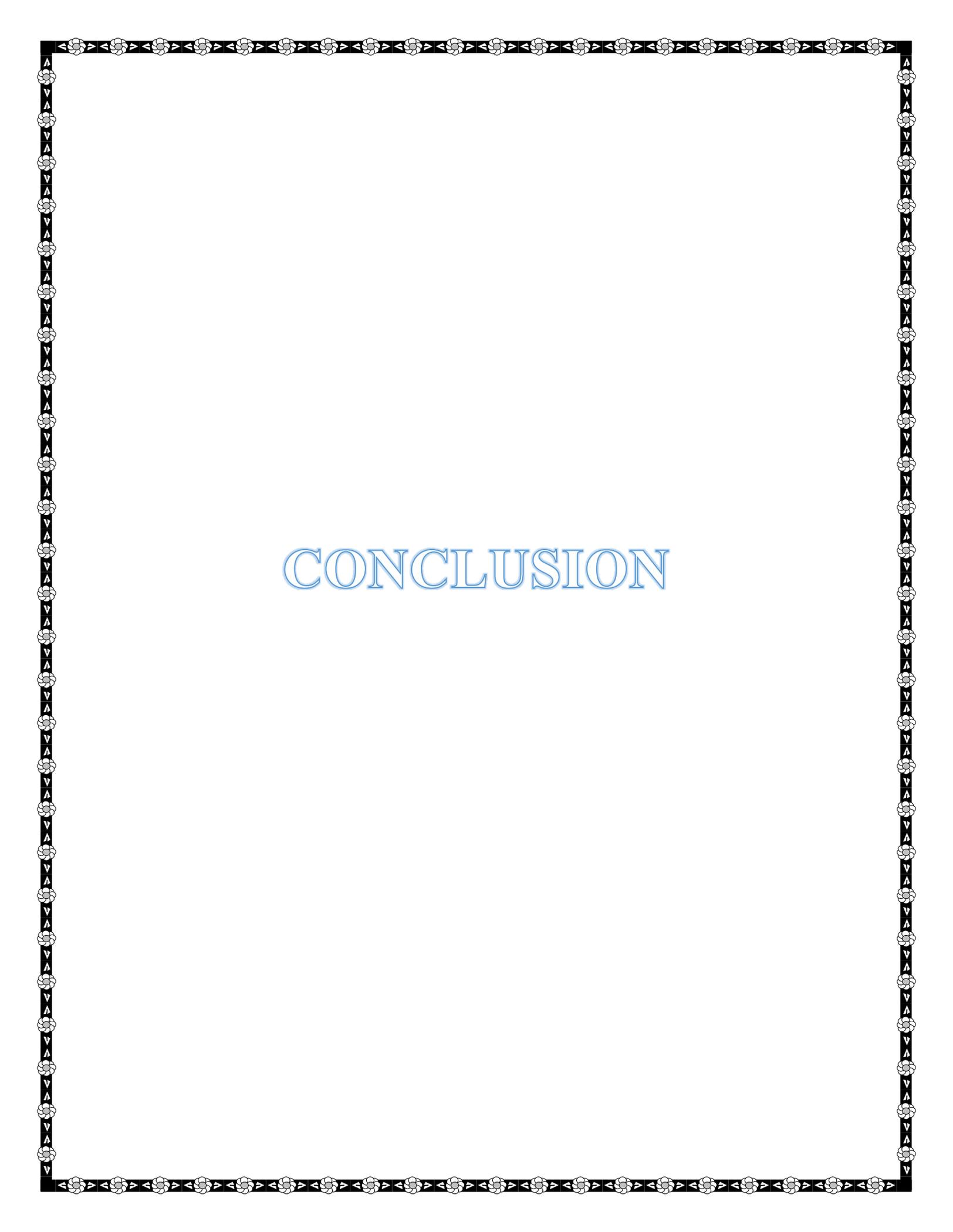
**Figure 30 évolution de poids des éprouvettes en fonction du temps**



**Figure 31 Histogramme de retrait des éprouvettes par a pour la date**

À partir de la figure 31, nous constatons que le poids diminue avec le temps

À partir de la figure 32, nous observons une diminution de la distance au fil du temps.



# CONCLUSION

## Conclusion générale

Cette étude s'inscrit dans le cadre de la valorisation des matériaux locaux de la région de Bordj Bou Arreridj dans le domaine de la construction. Notre contribution a porté sur l'exploitation des roûtes calcaires de la zone d'étude pour une application en génie routier. L'objectif principal de cette étude est d'améliorer les propriétés mécaniques et physiques des forages de la zone de Bordj Bou Arreridj.

En le traitant avec de la poudre de marbre pour une utilisation en coque de pavage ou en plateforme de support de pavage.

Le mémoire est présenté en deux parties distinctes, dans l'une, nous avons présenté les dernières technologies dans l'utilisation du tuf, et l'autre partie a un caractère purement expérimental.

Nous avons obtenu les résultats de tous les examens effectués sur les tufs non traités et traités.

Ces tufs ont été caractérisés sur la base des critères AFNOR. Les essais d'identification géotechnique ont pour but de classer et de localiser les matériaux par rapport aux spécifications et normes approuvées pour l'utilisation en chaussée. Ces essais nous ont permis de constater que.

Le tuf de Khalil présente une courbe granulométrique diffuse. Il est carbonaté ( $\text{CaCO}_3$  67%), et modérément argileux ( $\text{IP} = 19,63$ ). Il a un diamètre maximal ( $D_{\text{max}}$ ) de 31,5 mm, une fraction sableuse (inférieure à 2 mm) d'environ 57% et une teneur en fines (inférieure à  $80 \mu$ ) d'environ 42%. Il est classé A2 par le guide technique du GTR.

Des essais mécaniques (Proctor, RC et  $R_{\text{tb}}$ ) ont également été réalisés sur des joints non traités et durcis. Les résultats de l'essai Proctor modifié ont montré qu'il était classé du plus sensible au moins sensible (Khalil).

Sur la base des résultats des tests de résistance à la pression simple et si la valeur RC 28 jours est prise comme norme, on peut voir que le Tuf Khalil a de meilleures propriétés de portance et peu de résistance à la compression. Cette observation est en bonne corrélation avec les valeurs des propriétés physiques. Le Tuf Khalil contient moins d'oligo-éléments sous 80 micro.

Le dernier chapitre révèle tout d'abord le modus operandi utilisé dans la thèse. Le point est fait sur l'utilisation de tufs mélangés à de la poudre de marbre. Plusieurs variables ont été envisagées pour traiter l'éruption cutanée dans la zone d'étude.

Le cas du traitement de la poudre de marbre (9h, 7h, 5h de broyage):

- Traitement avec 10%
- Traitement avec 15% de cure
- Traitement avec 20%.

Ces résultats et les interprétations des essais mécaniques réalisés sur les tufs traités sont personnalisés. Ces résultats ont montré que le prétraitement de la poudre de marbre donne des résultats significatifs. En effet, la caractérisation mécanique a montré que la formule composée de tuf et de 15% de chélate présente une meilleure portance et une faible résistance à la compression. Cette formule est retenue comme le mélange optimal.

DOCUMENT

## **Documents :**

[1] **Mustapha, A, (2008) :** contribution a l'étude de la starisation aux liants hydraulique des tufs de région d'Adrar

[2] **Mohamed, H, (1981)** les tufs et encroûtement calcaires en Tunisie et dans le monde. Thésard service des études et recherches internationales laboratoire central des ponts et chaussées, Tunisie

[3] **Colombier, G, 1988.** Tufs et encroûtements calcaires : Utilisations routières. Synthèse, ISTEED.

[4] **Horta, O. S., 1979.** Les encroûtements calcaires et les encroûtements gypseux en géotechnique routière Service des publications du laboratoire de M.D.S., Base SONATRACH, Blida, Algérie. 110 p.

[5] **Mathieu, L., Thorez, J., et Ek, C., 1976.** Place et signification des croûtes et encroûtements calcaires dans les profils de sols et dans les paysages d'Afrique du nord-ouest. Ann. De l'I.N.A. El Harrach. vol. VI, 1, 81-138.

**Achour, Y, 2011.** Amélioration des propriétés mécaniques des tufs calcaires de la région de Sétif mémoire de Magister, université Tabassa.

[6] **Alloul, B, 1981.** Etude géologique et géotechnique des tufs calcaires et gypseux d'Algérie en vue de leur valorisation routière — Thèse de docteur de 3ème cycle de l'Université de Paris VI.

[6] **Chalhi, M, des travaux publics(2007) :** valorisation des granulats disponibles dan le sud de bachar

**Aubert, G, 1947.** Les sols à croûtes calcaires. C.R. Conf. Méditer. Montpellier-Alger, Publ. ASS. Franc. Et. Sol, Paris, 330-337.

**Ben-Dhia, M., 1983,** Les tufs et encroûtements calcaires en Tunisie et dans le monde, Bulletin de liaison Laboratoire des Ponts et Chaussées, NO 126,5-14.

**Benmati, A, 1993.** Contribution à l'étude de l'altération des roches carbonatées tendres en milieu semi-aride de Souaghi (Béni-Slimane). Relation avec la pédogenèse fersiallitique et la formation des croûtes et encroûtements calcaires. Thèse de magister, I.N.A. El Harrach, 255 p.

- Boulaine, J, 1961.** Les facteurs de formation des sols méditerranéens — Sols Africains. Vol.VI.
- Bock, L, 1984.** L'intégration chrono spatiale des accumulations calcaires. Approche morpho pédologique et géochimique dans un paysage semiaride de L'Atlas tellien (Algérie). Thèse doctorat, univ. Gembloux Belgique, 447 p.
- Briot, P., 1976.** Introduction à l'étude des calcrêtes. Rapport DEA. Pédologie et Aménagement des sols. Paris, 25 p.
- Charles, G, 1976.** Remarques sur la genèse et l'âge des "croûtes" carbonatées de la région méditerranéenne. Ann. De I'I.N.A. El Harrach. Vol. VI, no 1, 159-162.
- Durand, J.H, 1963.** Les croûtes calcaires et gypseuses en Algérie : formation et âge. Bull. Soc. Géol. France, 7, 5•, 959-968.
- Fenzy, E., 1966.** Particularité de la technique routière au Sahara. Revue générale des routes et aérodromes, NO 411, p. 57-71.
- Fumet, P., 1959.** Chaussées en sables gypseux et en sables stabilisés chimiquement. Revue général des routes et aérodromes, numéro spécial Sahara, NO 329, p. 169-178.
- Gaucher, G., 1948.** Sur certains caractères des croûtes calcaires en rapport avec leur origine. C.R.A Sciences Paris, 154-156.
- Goual Idriss., 2012.** « Comportement mécanique et hydrique d'un mélange de tuf et sable calcaire de la région de Laghouat : application en construction routière. » Thèse de doctorat, Université ABOUBAKR Belkaid Tlemcen.
- GTR, 1992.** Réalisation des remblais et des couches de forme. Guide technique, LCPC-SETRA, 204 p.
- Mazouz Rabah, 2014.** Etude du comportement physique et mécanique des mortiers à base de différents types de sable.
- Netterberg, F, 1969.** The géologie and engineering properties of South African calcretes. Ph.D. Thesis, University of Witwatersrand, Johannesburg.
- Pouget M., 1980.** Les sols à croûtes calcaires dans les steppes algériennes. Quelques aspects morphologiques et esquisse d'une évolution actuelle « Cah. ORSTOM » Sec. Pédol. 18, 3.4, 235-236.

Ruellan, A., 1976. Morphologie et répartition des sols calcaires dans les régions méditerranéennes et désertiques. Ann.Agr. (INA) vol VI, no 1,11-39.

SETRA et LCPC, Classification des matériaux utilisable dans la construction des remblais des couches de Forme d'infrastructures routière", guide technique, France, Septembre 1992.

Vogt, T., 1984. Croûte calcaire : type et genèse. Exemple d'Afrique du nord et de France méditerranéenne. Thèse de doctorat d'état, Université Louis Pasteur, Strasbourg, 228p.

Touati.S .2017 étude d'un mélange tuf-sable concassé pour essai de chassé .

### **Notations ;**

**AFNOR** ; Association Françaises de Normalisation, publication, Paris, [www.afnor.fr](http://www.afnor.fr)

**ANRH** Agence Nationale des Ressources Hydriques cc Coefficient de courbure **Cu** Coefficient d'uniformité

**Et360** Module sécant à 360 jours

**LGC.UBBA** Laboratoire de Génie civil (Université de Bordj Bou Arreridj)

**GTR** Guide des terrassements routiers

**I<sub>c</sub>** ; Indice de consistance

**LTPE** Laboratoire Des Travaux Publique de l'EST

**LHF** Laitiers Hauts Fourneaux

**R<sub>c</sub>** Résistance à la compression simple

**R<sub>tb</sub>** Résistance à la traction indirecte

**VBS** Valeur de bleu de sol

**WL** Limité de liquidité

**W<sub>n</sub>** Teneur en eau naturelle

**W<sub>p</sub>** Limité de Plasticité

**W<sub>opm</sub>** Teneur en eau de l'optimum Proctor modifié

**γ<sub>dopm</sub>** Densité sèche de l'optimum Proctor modifié

**Normes :**

<b>NFP 94-050</b>	Sols : Reconnaissance et essais- Détermination de la teneur en eau pondérale des sols- méthode par étuvage	<b>Décembre 1990</b>
<b>NFP 94-056</b>	Sols : Reconnaissance et essais- Analyse granulométrique-Méthode par tamisage à sec après lavage.	<b>Mars 1996</b>
<b>NFP 94-057</b>	Sols : Reconnaissance et essais- Analyse granulométrique des sols — Méthode par sédimentation.	<b>Mai 1992</b>
<b>NFP 94-068</b>	Sols : Reconnaissance et essais- Mesure de la capacité d'adsorption de bleu de méthylène d'un sol ou d'un matériau.	<b>Octobre 1998</b>
<b>NFP 94-093</b>	Sols : Détermination des références de compactage d'un matériau- Essai PROCTOR modifié.	<b>Octobre 1999</b>
<b>NFP 94-093</b>	Sols : Reconnaissance et essais- Détermination des références de compactage d'un matériau-Essai PROCTOR norma1-Essai PROCTOR modifié.	<b>Octobre 1999</b>
<b>NFP 18-573</b>	Granulats (Essai Los Angeles).	<b>Décembre 1990</b>