

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Mohamed khider –Biskra  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département de Génie civil et d'Hydraulique  
Référence : ...../2020



جامعة محمد خيضر بسكرة  
كلية العلوم و التكنولوجيا  
قسم الهندسة المدنية و الري  
المرجع ...../2020

## Mémoire de Master

**Filière : sciences et technologies**

**Génie civile et hydraulique**

**Spécialité : Géotechnique**

**Thème**

**Identification, classification et caractérisation des  
sols fins**

**Nom et Prénom de l'étudiant :**

**Rahal Nour Elhouda**

**Encadreur :  
Dr. Abdelaziz Salim**

**Année universitaire : 2019 – 2020**

# Dédicaces

*Je remercie Dieu Tout-Puissant pour lui et son aide pour mener à bien cette recherche*

*À celui qui m'a donné tout ce qu'il avait pour que je puisse réaliser ses espoirs envers lui, à celui qui m'a  
poussé en avant*

*Pour atteindre le désiré, à la personne qui possédait l'humanité avec tout pouvoir, à celle qui veillait sur mon  
éducation*

*Avec d'énormes sacrifices traduits en sa vénération pour la science, à ma première école dans la vie,*

*Mon cher père, que Dieu prolonge sa vie.*

*À celle qui a donné à la joie de son cœur toute la tendresse et la tendresse, à celle qui est patiente avec tout,*

*Celle qui a pris soin de moi et a été mon soutien dans l'adversité, et sa préférence à moi était de la chance,*

*Elle m'a suivi pas à pas dans mon travail, à qui je me détendais chaque fois que je me souvenais de son sourire  
sur mon visage*

*Source de tendresse, ma mère est l'ange le plus cher dans le cœur et l'œil. Que Dieu la récompense pour moi*

*Darin; À eux je leur dédie cet humble acte pour apporter un peu de bonheur à leur cœur*

*À mes frères et sœurs qui ont partagé avec moi le fardeau de la vie;*

*Je dédie également le fruit de mes efforts à mon professeur Dr. Abdelaziz Salim, qui chaque fois que la  
route s'assombrit*

*Devant moi j'y ai recouru, puis ça s'a éclairé pour moi, et chaque fois que je devenais désespéré, je semais  
l'espoir d'un captif*

*Et plus je demandais des connaissances qu'elle me donnait, et plus je lui demandais le temps précieux que je  
pouvais lui consacrer*

*Lee malgré ses multiples responsabilités; À tous les professeurs du département de génie civil et  
d'irrigation;*

*Et à mon amis, Amri Meriem je les remercie beaucoup pour leur aide et leur soutien.*

*À tous ceux-ci, je dédie ce travail.*

# Remerciements

*On remercie dieu le tout puissant de nous avoir donné la santé et la volonté  
d'entamer et de terminer ce mémoire.*

*Tout d'abord, ce travail ne serait pas aussi riche et n'aurait pas pu avoir le jour sans  
l'aide et l'encadreur de Dr. Abdelaziz Dalim, on la remercie pour la qualité de son  
encadrement exceptionnel, pour sa patience, sa rigueur et sa disponibilité durant  
notre préparation de ce mémoire, pour ces idées brillantes et pour son aide à la  
réalisation de certaines expériences.*

*Je tiens à remercier mes chers amis et collègues notamment Amri Meriem.*

*Et, enfin, j'adresse toute ma gratitude à ma chère famille, et très particulièrement  
ma mère, pour leurs encouragements et soutien permanents.*

## Résumé :

Cette étude s'inscrit dans le cadre d'un programme de recherche sur l'identification et caractérisation des argiles de la wilaya de Biskra et Batna, et sur la classification des argiles.

On a effectué des essais d'identification et de caractérisation de trois argiles (El-Kantra, Sabaa Mkataa, Timgad).

Les argiles étudiées présentent des comportements différents suivant le pourcentage des particules fines, plasticité, gonflement,.....

Enfin, nous classons le sol pour connaitre ses propriétés à travers les résultats obtenus à partir des expériences.

**Mots clés :** argile –gonflement- identification-sols fin-classification-caractérisation.

## Abstract:

This study is part of a research program on the identification and characterization of clays of the wilaya of Biskra and Banta, and on the classification of clays. Three clays (El-kantra, Sabaa Mkataa, and Timgad) were tested for identification and characterization. The clays studied exhibit different behaviors depending on the percentage of fine particles, plasticity, swelling, ..... Finally, we classify the soil to know its properties through the results obtained from the experiments.

**Keywords:** clay –swelling- identification-fine-classification-characterization soils.

# ملخص :

تندرج الدراسة في إطار برنامج بحثٍ حول التعرف على خصائص غضار ولاية بسكرة وباتنة. وتصنيف الغضار.

قمنا بتجارب التعرف والتخصيص ثلاث مناطق من ولاية بسكرة (القنطرة، سبع مقاطع، تيمقاد).

أنواع الغضار المدروسة تبين السلوك المختلف حسب نسبة العناصر الناعمة، الانتفاخ، اللدونة،.....

وأخيراً نصنف التربة لمعرفة خصائصها من خلال النتائج المتحصل عليها من التجارب.

**الكلمات المفتاحية:** غضار - الانتفاخ - التحديد - التربة الناعمة - التصنيف - خصائص

# Liste des Figures

## Chapitre 1. Les sols fins

Figure 1-1 : unités structurales (a, b, c). Tétraédrique et octaédriques. ....	4
Figure 1-2 (a, b, c)– Eléments structuraux : les tétraèdres (Eslinger & Peaver, 1988). ....	4
Figure 1-3 (d, e)– Eléments structuraux : les octaèdres (Eslinger & Peaver, 1988). ....	5
Figure 1-4: familles argileuses (Moore & Reynolds, 1989). ....	5
Figure 1-5: Structure de minérale argileuse « la kaolinite ». ....	6
Figure 1-6: Schéma de la structure de la kaolinite (d’après Lambe(1953), cité par Holtz, R.D et Kovacs, W.D (1991).) ....	6
Figure 1-7: Structure de minérale argileuse (illite). ....	7
Figure 1-8 : structure de minéraux argileux (Chlorite, la montmorionillite). ....	8
Figure 1-9 : types de phyllosilicates formés au cours de l’altération. ....	10
Figure 1-10 : un feuillet élémentaire est constitué par l’association de deux unités structurales des base : (a) le tétraèdre silicium, (b) l’octaèdre aluminium (ou magnésium). ....	12
Figure 1-11 : un feuillet élémentaire est constitué par l’association de trois unités structurales des base : (a) le tétraèdre silicium, (b) l’octaèdre aluminium (ou magnésium) un autre (a) tétraèdre silicium. ....	12
Figure 1-12 : le feuillet élémentaire est identique à celui observé chez les argiles de la famille des illites. ....	12
Figure 1-13 : Diagramme de classification du potentiel de gonflement (Seed et al, 1962). ....	15
Figure 1-14: Courbe de retrait classique ....	17

## Chapitre 2. Identification, classification et caractérisation des sols

Figure 2-1:Un appareille de casagrande se compose .....	20
Figure2-2 :D'un support métallique.....	20
Figure2-3 : Une étuve.....	21
Figure2-4 : Une balance.....	21
Figure 2-5: Une spatule.....	21
Figure 2-6 : Une plaque lisse en marbre .....	21
Figure 2-7 : Une plaque de verre.....	21
Figure 2-8 : La pâte recouvre le fond de la coupelle, sauf sur une partie d d'environ 3cm.	21
Figure 2-9 : Noter sa nouvelle position l'enfoncement h doit être comprise entre 12 et 25 mm.....	22
Figure 2-10: Rouler la boulette sur une plaque lisse de façon à partir de obtenir un rouleau de 3mm de diamètre et de 10 cm de longueur.....	23
Figure 2-11 : Série de Tamis .....	23
Figure 2-12 : Balance.....	23
Figure 2-13 : Une étuve ventilée à température réglable à 105° .....	23
Figure 2-14 : Le poids de 500g d'argile .....	24
Figure 2-15: Prendre l'échantillon mh et le laisser tremper au préalable pendant 2 à 24 heures. ....	24
Figure 2-16: analyse granulométrique par voie humide.....	24
Figure 2-17 : Un Tamis 0,08.....	25

Figure 2-18:Balance.....	25
Figure 2-19:Agitateur mécanique.....	25
Figure 2-20: Eau distillée ou Déminéralisée et défoculant Eprouvette 1L.....	25
Figure 2-21 : Produit (hexamétaphosphate de sodium) .....	25
Figure2-22 : Un thermomètre.....	26
Figure 2-23 : Densimètre.....	26
Figure 2-24: Étuve.....	26
Figure 2-25 : Sédimentométrie.....	26
Figure 2-26: Un agitateur .....	27
Figure 2-27: Solution de bleu méthylène et balance.....	27
Figure 2-28: essai de bleu méthylène.....	28
Figure 2-29 : résulta de test bleu méthylène. ....	28
Figure 2-30: Classification triangulaire des sols fins (contenant moins de 30% d'éléments de diamètre supérieur à 2 mm).....	30
Figure 2-31 : Abaque de plasticité de Casagrande. Classification LC PC des sols fins. ....	32
Figure 2- 32: On prend 2 kg d'argile.....	36
Figure 2-33: tamiser à tamis 5 mm préalablement préparé qu'on verse dans un bac. ....	37
Figure 2-34: On ajoute une certaine quantité d'eau proportionnelle on poids d'argile utilisé. ....	37
Figure 2-35: On remplit le moule Proctor normalisé en trois couche on compacte l'aide de la dame Proctor normal en 25 coup.....	37
Figure 2-36: Place de la 2 émé et 3 émé couchent. ....	37



Figure 2-37: Nous l'enlevons en utilisant un appareil. ....	38
Figure 2-38: Déterminer la teneur en eau et le poids volumique $\gamma_d$ .....	38
Figure 2-39 : schéma de la boîte de cisaillement. ....	38
Figure 2-40: l'appareille cisaillement.....	39
Figure 2-41: l'appareille oedomètre.....	40
Figure 2-42 : exploitation de la courbe de consolidation d'après la méthode de Casagrande .....	41
Figure 2-43: l'appareil triaxial.....	41
Figure 2-44 : cercle de Mohr.....	45
Figure 2-45: Représentation du critère de Mohr–coulomb. ....	45
Figure 2-46: l'appareil triaxial.....	46

### **CHAPITRE 03 : Résultats expérimentaux et discussion**

Figure 3-1: présentation de site de prélèvement wilaya de Biskra et Batna. ....	47
Figure 3-2:Argile El-kantra.....	48
Figure 3-3: argile de Sabaa Mkataa.....	48
Figure 3-4: Argile de Timgad.....	48
Figure 3-4 : courbe analyse granulométrique de argile El-kantra.....	55
Figure 3-5 : courbe analyse granulométrique de argile sabaa mkataa. ....	56
Figure 3-6 : analyse granulométrique d'argile Timgad.....	57
Figure 3-7 : classification des sols fins, diagramme de plasticité LCPC 1965 .....	62

# Liste des Tableaux

## Chapitre 1. Les sols fins

Tableau 1-1 : Classification des minéraux argileux selon la charge globale du feuillet et de la composition de sa couche octaédrique. ....	9
Tableau 1-2 : Relation entre le gonflement libre et l'indice de plasticité (Seed, et al. 1962).....	15
Tableau 1-3 : classification proposé par Dakshanamurthy et Raman (1973). ....	16
Tableau 1-4 : relation entre potentiel de gonflement et limite de retrait (Altemeyer, 1955).....	16
Tableau 1-5 : valeurs indicatives pour les sols susceptibles de variation de volume (Bigot et Zerhouni, 2000).....	17

## Chapitre 2. Identification, classification et caractérisation des sols

Tableau 2-1: Classification des sols grenus (plus de 50 % d'éléments > 0,08 mm).....	33
Tableau 2-2 : La classification GTR pour les sols A, B, C et D. ....	35
Tableau 2-3 : Temps unitaire moyen pour des terrassements faits manuellement (équipe de 2 manœuvres).....	35

## CHAPITRE 03 : Résultats expérimentaux et discussion

Tableau3-1 : limite de liquidité de l'argile El-kantra.....	50
Tableau3-2 : limite de liquidité de l'argile de Sabaa Mkataa .....	50
Tableau 3-3 : limite de liquidité de l'argile de Timgad.....	51
Tableau 3-4 : limite de plasticité de l'argile El-kantra.....	51
Tableau 3-5 : limite de plasticité de l'argile Sabaa Mkataa .....	51
Tableau 3-6 : limite de plasticité de l'argile de Timgad .....	52
Tableau 3-7 : l'indice de consistance et de plasticité .....	52
Tableau 3-8: Analyse granulométrique de l'argile de Sabaa Mkataa .....	53
Tableau 3-9: Analyse granulométrique de l'argile d'El-kantra .....	53
Tableau 3-10: Analyse granulométrique de l'argile de Batna (Timgad) .....	54
Tableau 3-11: analyse granulométrique par sédimentométrie d'Argile El-kantra.....	55
Tableau 3-12: analyse granulométrique par sédimentométrie Argile Sabaa mkataa .....	56
Tableau 3-13 : analyse granulométrique par sédimentométrie Argile Timgad.....	57
Tableau 3-14 : valeur de bleu méthylène .....	58
Tableau 3-15: résultat d'essai Proctor l'argile d'El-kantra .....	59
Tableau 3-16 : résultat d'essai Proctor l'argile de sabaa mkataa .....	60
Tableau 3-17 : résultat d'essai Proctor l'argile de Timgad .....	61
Tableau 3-18: l'absorption d'eau.....	62
Tableau 3-19 : classification proposée par Dakshanamurthy et Raman(1973).....	63

Tableau 3-20 : Qualificatif de la fraction du sol constituée d'éléments inférieurs à 400 $\mu\text{m}$ en fonction de l'indice de plasticité afnor P 94-011 .....	63
Tableau 3-21: Potentiel de gonflement d'après Ranganatham Et Satyanarayana (1965).....	63
Tableau 3-22 : la susceptibilité de variation de volume en fonction de $V_{BS}$ Bigot et Zerhouni, 2000. ....	64
Tableau 3-23: Qualificatif de la fraction argileuse d'après la norme afnor p 94-011 .....	64
Tableau3-24 : Qualificatif du sol en fonction de l'indice de consistance afnor P 94-011....	65

# Sommaire

## Chapitre 1. Les sols fins

1-1-1 Définition :.....	2
1-1-2 Propriétés des sols fins :.....	2
L'argile :.....	2
1-2-1 Définition :.....	2
1-2-2 Les minéraux argileux :.....	3
1-2-3 Structure des minéraux argileux :.....	3
1-2-4 Eléments structuraux :.....	4
1-2-5 Types structuraux et classification des argiles :.....	5
1-2-6 Il existe plusieurs familles de minéraux (phyllosilicates). .....	5
1-2-7 Minéraux interstratifiés : .....	9
Origine des argiles : .....	9
Héritage et altération :.....	9
Transformations des minéraux argileux :.....	10
Les argiles du sol : .....	10
1-4-1 Nature des minéraux argileux :.....	10
1-4-2 La nature de la roche-mère joue un rôle :.....	10
Phénomène de gonflement :.....	11
1-3-1 Introductions.....	11
1-5-2 définitions :.....	11
1-5-3 Un aperçu sur la microstructure des argiles : .....	11

1-5-4 Définition des paramètres de gonflement :.....	13
1-5-5 Méthodes indirectes de caractérisation :.....	14
1-6 Retrait des sols gonflants :.....	17

## **Chapitre 2. Identification, classification et caractérisation des sols**

2-1 Identification des sols : .....	19
2-1-1 Introduction : .....	19
2-1-2 Description des essais.....	20
2-1-2-1 limite d'atterberg : (NF P94-051/ NF P94-052-1).....	20
2-1-2-2 Analyse granulométrique par voie humide :.....	23
2-1-2-3 Par sédimentométrie .....	25
2-1-2-4 Essai bleu de méthylène : .....	27
2-2 Classification des sols :.....	28
2-2-1 Introduction :.....	28
2-2-2 But de la classification :.....	28
2-2-3 Principe de classification : .....	28
2-2-5 Classification triangulaire :.....	29
2-2-6 Classification (LPC/USCS) des sols :.....	31

2-2-7 Classification LPC modifiée : .....	34
2-2-8 la classification GTR : .....	34
2-3 Caractérisation des argiles : .....	35
2-3-1 Etudes des caractéristiques mécaniques des argiles : .....	36
2-3-2 Comportement mécanique : .....	36
2-3-2-1 Essai Proctor : .....	36
2-3-2-2 L'essai de cisaillement direct : .....	38
2-3-2-3 L'essai de compressibilité : .....	40
2-3-2-4 Essai triaxial : .....	41

### **CHAPITRE 03 : Résultats expérimentaux et discussion**

3-1 Expression et résultats des essais : .....	49
3-2 Présentation de résultats : .....	50
3-2-1 Limite de plasticité WP : .....	51
3-2-2 Par sédimentométrie : .....	54
3-3 Essai au bleu de méthylène : .....	58
3-4 Essai Proctor : .....	58
3-5 Classification des argiles : .....	62
3-5-1 Limite d'Atterberg : .....	62
3-5-2 La plasticité : .....	63
3-5-3 La consistance .....	65

# Introduction générale

La géotechnique est l'ensemble des activités liées aux applications de la Mécanique des sols, de la Mécanique des Roches et de la Géologie de l'Ingénieur. La Mécanique des sols étudie particulièrement le comportement des sols sous leurs propres aspects de résistance et déformabilité.

En géotechnique, le sol est « la formation naturelle de surface, à structure meuble et d'épaisseur variable, résultant de la transformation de la roche-mère sous-jacente sous l'influence de divers processus, physiques, chimiques et biologiques, au contact de l'atmosphère et des êtres vivants ».

Un sol est défini comme un mélange d'éléments solides (le plus souvent des particules ou grains) constituant le squelette solide, d'eau (pouvant circuler ou non entre les particules) et d'air ou de gaz. Il est donc, en général constitué de trois phases phase solide, phase liquide, phase gazeuse

L'étude complète des sols non saturés, qui constituent un milieu à trois phases, est très complexe. Nous nous limiterons dans un cadre d'étude des sols secs ou saturés.

Bien que cette classification soit très grossière on peut distinguer essentiellement deux types de sols comme indiqué dans les « Règles Techniques pour la Conception et le Calcul des Fondations des Ouvrages de Génie Civil » (Fascicule 62 de 1993 du Ministère de l'Équipement et du Logement) :

- les sols grenus (pulvérulents) à  $d_{50} > 80 \mu\text{m}$  (50 % des éléments du sol est supérieur à  $80 \mu\text{m}$ ),
- les sols fins (ou cohésifs) à  $d_{50} < 80 \mu\text{m}$ , pour lesquels nous retiendrons la présence d'argile qui est un matériau très sensible à l'eau, mais aussi de limons

Les sols fins sont des matériaux très souvent rencontrés en génie civil, particulièrement en géotechnique environnementale parce qu'ils sont disponibles dans les terrains naturels et qu'ils possèdent une bonne aptitude à l'étanchéité. Dans les applications courantes ces matériaux sont généralement composés de trois phases (solide, liquide et gazeuse). Ils peuvent être saturés ou non saturés.

- Le premier chapitre est une recherche bibliographique. Elle décrit la minéralogie et la structure des sols argileux, les propriétés physiques et mécaniques et l'utilisation des argiles. Une brève présentation générale sur l'identification caractérisation des argiles.
- La deuxième partie est consacrée à l'élaboration et à la identification et caractérisation des argiles. Dans un premier temps nous discuterons les résultats obtenus sur les sols argileux. Ensuite classification des argiles.



# Chapitre 1 :

# Les sols fins

## Introduction :

Le terme « sol » est utilisé en génie civil pour désigner un matériau constitué d'un agrégat naturel de particules minérales de dimension comprise dans des limites prédéfinies.

Il existe deux types de sol (les sols fins, les sols grains). Et dans notre sujet, nous traitons de l'étude des sols fins (argile).

Les sols argileux sont constitués de minéraux variés dont l'affinité à l'eau dépend de plusieurs paramètres, entre autre la structure minéralogique. Certains sols comportent une proportion de particules argileuses telles que les Illites et les Smectites, etc. Quand ils subissent à des influences extérieures, à titre d'exemple variation de la teneur en eau...etc. peuvent engendrer des dégâts estimatifs.

L'ingénieur est donc souvent confronté à des problématiques majeurs lors l'étude des ouvrages construits sur ce genre des sols car souvent les campagnes de reconnaissances géotechniques ne prévoient pas la mesure de plusieurs paramètres attachés à certains phénomènes. Parmi les causes d'instabilité d'ouvrages les plus rencontrés dans le monde entier et l'Algérie en particulier, le phénomène de retrait gonflement, l'effondrement et la dispersion.

Lorsque les sols fins sont humidifiés à partir d'un état sec, ils subissent des gonflements dus d'une part, à l'absorption des molécules d'eau sur la surface extérieure des particules et d'autre part, à la pénétration des molécules d'eau entre les feuillets dont, l'empilement constitue les particules d'argile.

## 1-1 Sols fins :

### 1-1-1 Définition :

Les sols fins (ou sols cohérents)  $d < 20 \mu\text{m}$  avec cohésion (argile, limon) : comportement très différent en fonction des teneurs en eau (état solide, plastique ou liquide).

On appelle sol fin un sol comportant au moins 50 % (en poids) de grains de dimension inférieure à  $80 \mu\text{m}$ . Le comportement d'un sol fin est très lié à sa teneur en eau, mais aussi à sa structure cristalline et à sa composition minéralogique.

### 1-1-2 Propriétés des sols fins :

- Cohésion assurée par frottements et forces d'attraction entre les grains
    - dépendants de la forme, l'angularité, la compacité et de l'effet de surface des grains
    - dépendants de la teneur en eau
  - résistance au cisaillement et à la traction
  - imperméables et gélifs
  - sensibles à l'eau (gonflements ou retraits)
- Un sol est un assemblage hétérogène de particules ou de cristaux aux propriétés très variables : dimensions, formes, propriétés physico-chimiques, etc...  
Un sol contenant de l'argile sera influencé par la teneur en eau, c'est une question centrale en géotechnique.

## 1-2 L'argile :

### 1-2-1 Définition :

Les argiles sont des roches constituées d'une variété de minéraux très fins, plus ou moins bien définis, et dont la forme est généralement aplatie. Ils sont constitués par des minéraux spécifiques dits: argileux, mais on trouve aussi des espèces dont les plus fréquentes sont la silice, des silicates non phylliteux, des oxydes, des hydroxydes cristallisés ou amorphes et des carbonatés.

Les minéraux argileux et les argiles sont étudiés dans de nombreux domaines. Pour les géologues, les argiles apportent des informations sur les conditions environnementales. Les ingénieurs pétroliers déduisent les conditions thermiques des gisements. Les ingénieurs civils s'intéressent aux propriétés des argiles en tant que matériel industriel. Les agronomes analysent les propriétés d'hydratation et d'adsorption des argiles pour concevoir les fertilisants. Quel que soit la discipline, la structure cristalline des argiles est importante car elle est responsable des propriétés spécifiques du minéral. En génie civil, argile veut dire sol argileux, c'est-à-dire un sol qui peut contenir certains minéraux argileux ou tout autre minéral. Les argiles sont des sols à grains fins, mais ça ne veut pas dire que les sols à grains

fins forcément des argiles cohérents. Les silts sont des sols à grains fins mais ils ont le comportement des sols granulaires ils sont pulvérulents et non plastiques.

Les argiles constituent une famille de matériaux omniprésents dans notre quotidien comme dans notre environnement. Sèches, elles semblent aussi solides que des roches, boueuses, elles s'écoulent comme des huiles. Elles sont maintenant utilisées dans des constructions de très grands ouvrages et forment souvent le sous-sol des agglomérations urbaines.

### **1-2-2 Les minéraux argileux :**

Ce sont des aluminiums dont les feuillets sont constitués de couches d'octaèdres et de couches de tétraèdres  $\text{SiO}_4$  reliées par les atomes O et OH mis commun. La distance inter réticulaire de sépare 2 feuillets successifs. Les substitutions d'atomes sont fréquentes dans les feuillets. L'édifice cristallin peut être désorganisé (la cristallinité est moins bonne). D'autre part, il ya des déséquilibre est compensé par adsorption de cations dans l'espace inter foliaire (capacité d'échange des argiles). D'après la structure du feuillet, on distingue principalement les argiles 1/1 (1 couche tétraédrique + 1 couche octaédrique) et les argiles 2/1 (2 tétra. Pour 1 octaédrique).

### **1-2-3 Structure des minéraux argileux :**

Les cristallites d'argile sont formées par un empilement parallèle de feuillets élémentaire dont le squelette est essentiellement constitué par des ions oxygènes et hydroxyles. Leur structure est composée de deux unités :

- la couche octaédrique :

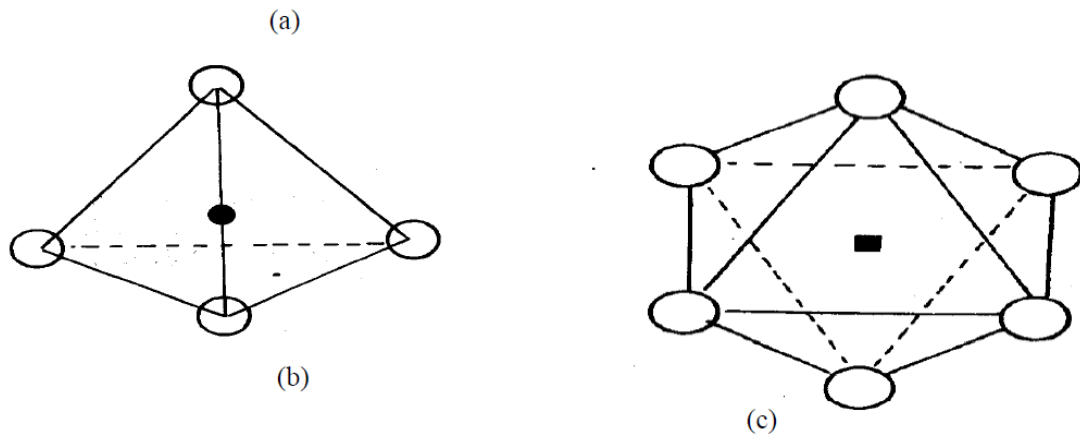
Cette structure est composée de deux feuillets d'oxygènes ou hydroxyles compacts dans lesquelles des ions d'aluminium, de fer et de magnésium sont incrustés.

- la couche tétraédrique :

Dans chaque couche tétraédrique, un atome de silice se trouve au centre d'un tétraèdre à équidistance des quatre atomes d'oxygène ou d'hydroxyles.

Les groupes tétraèdres de silice sont disposés en réseau hexagonal qui se répète à l'infini pour former une feuille de composition  $\text{Si}(\text{OH})_4$ .

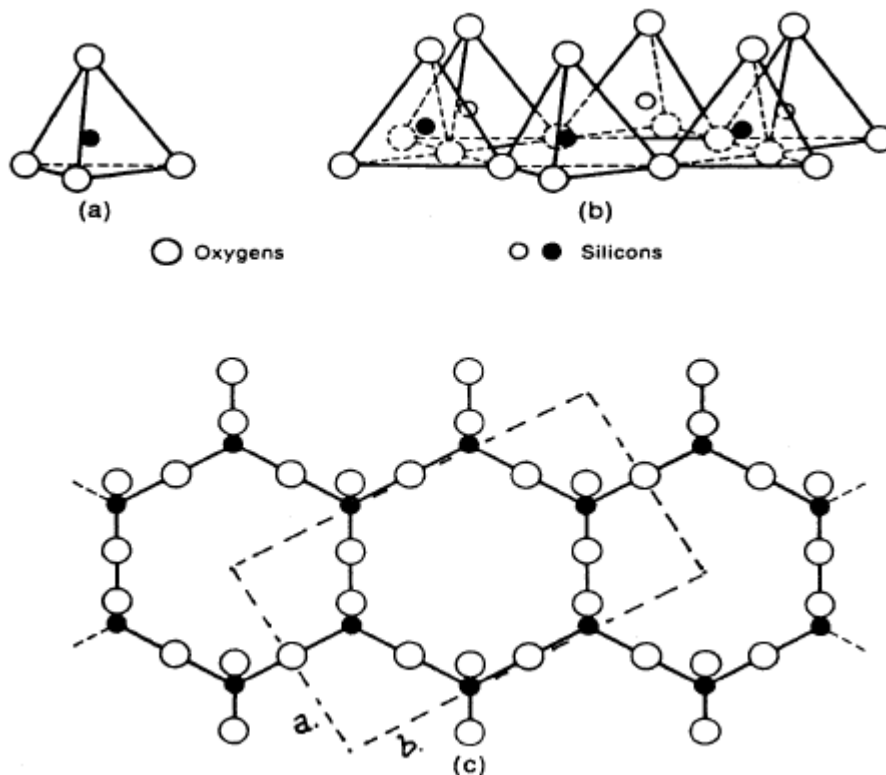
C'est les différentes combinaisons entre les deux unités ainsi que la modification de la structure de base qui forment la gamme des minéraux argileux possédant de caractéristiques différentes.



**Figure 1-1** : unités structurales (a, b, c). Tétraédrique et octaédriques.

### 1-2-4 Eléments structuraux :

Les silicates constituent le modèle de base. Ils sont formés par un agencement de tétraèdres de  $\text{SiO}_4$  dans lesquels un atome de Si est entouré de 4 atomes d'O (fig. 1-2a). Les tétraèdres s'agencent en se partageant l'oxygène en mailles hexagonales (fig. 1-2b). Les hexagones s'agencent et forment une double chaîne. Dans les phyllosilicates, les tétraèdres forment des feuillets composés de 6 tétraèdres. Les O non partagés pointent tous dans la même direction. La formule de base est  $\text{Si}_4 \text{O}_{10}^{4-}$ . La charge négative est compensée par l'accommodation de cations de petite taille Si, Al et rarement  $\text{Fe}^{3+}$  (fig. 1-2c). [1]



**Figure 1-2 (a, b, c)** – Eléments structuraux : les tétraèdres (Eslinger & Peaver, 1988).

Les tétraèdres s'associent à des feuillets octaédriques composés d'un cation central et 6 OH<sup>-</sup> (fig1-3 d). Cette configuration permet d'accueillir des cations plus larges Al<sup>3+</sup>, Fe<sup>3+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Fe<sup>2+</sup> mais pas Ca<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>. Le feuillet octaédrique est constitué de 2 plans d'OH ou O, il est couché sur une de ses faces. Il peut exister seul. Dans la brucite (fig1-3 e), Mg(OH)<sub>6</sub>, toutes les positions cationiques sont occupées. Dans la gibbsite, Al<sub>2</sub>(OH)<sub>6</sub>, par contre 2 position sur 3 sont occupées.[1]

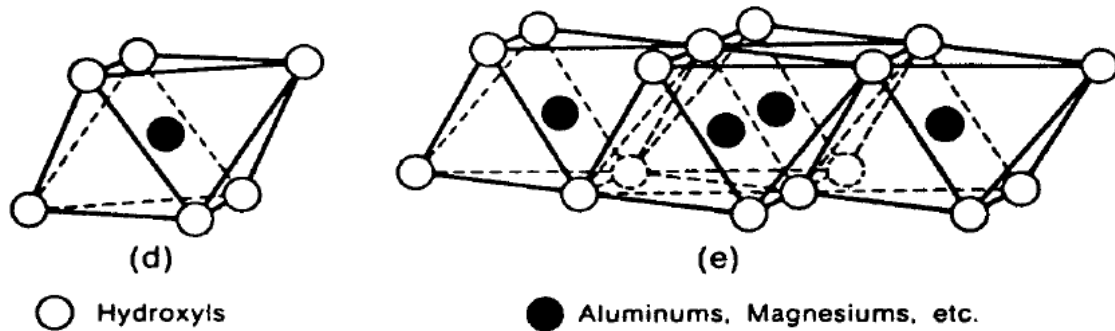


Figure 1-3 (d, e)– Éléments structuraux : les octaèdres (Eslinger & Peaver, 1988).

### 1-2-5 Types structuraux et classification des argiles :

- 1- les minéraux T/O ou 1/1 avec un espace basal de 7Å (kaolinite),
- 2- les minéraux T/O/T ou 2/1 avec un espace basal de 9.5Å pour le talc et la pyrophyllites, 10Å pour l'illite et l'halloysite, 10,4Å pour la sépiolite, 14 à 15Å pour les smectites et les vermiculites,
- 3- les minéraux T/O/T/O ou 2/1/1 avec un espace basal de 14Å (chlorite).

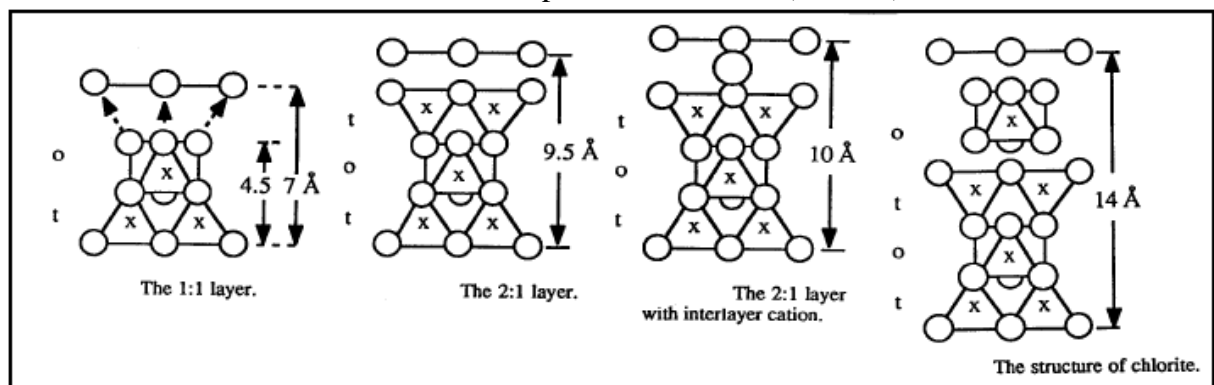


Figure 1-4: familles argileuses (Moore & Reynolds, 1989).

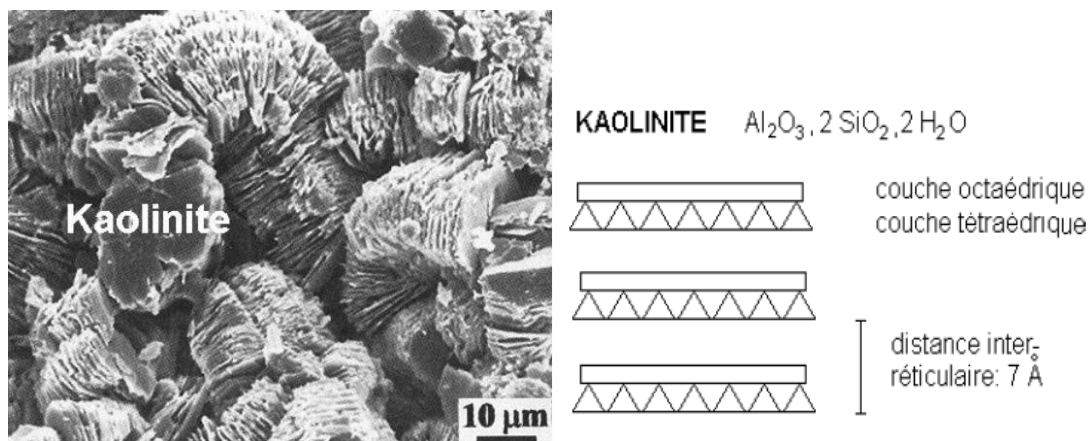
### 1-2-6 Il existe plusieurs familles de minéraux (phyllosilicates).

- La famille des minéraux à 7 Å.
- La famille des minéraux à 10 Å.
- La famille des minéraux à 14 Å.[2]

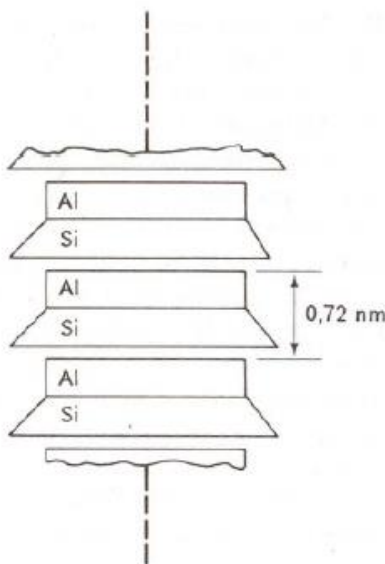
#### – famille des minéraux à 7 Å

Chaque feuillet est constitué par l'association d'une couche tétraédrique et d'une couche octaédrique, le représentant de cette famille et le plus commun est la kaolinite, c'est un

minéral de feuillets en tétraèdre (silice) et de feuillets en octaèdre (aluminium), les deux feuillets sont liés de telle manière qu'ils forment une seule couche d'épaisseur d'environ 7 Å qui s'étend indéfiniment dans les deux autres directions. La liaison entre deux feuillets adjacents est assurée par des liaisons hydrogènes. Ces liaisons s'établissent entre les hydroxyles de la couche octaédrique et les oxygènes de la couche tétraédrique. Elles entraînent un rapprochement des feuillets adjacents, empêchant toute pénétration de molécules d'eau, de molécules organiques ou d'ions minéraux. Il n'existe donc aucune possibilité de gonflement ou de rétraction des feuillets. La faible capacité d'échange des kaolinites est due à des sites de surface amphotères, On représente les schémas des motifs unitaires. [2]



**Figure 1-5:** Structure de minérale argileuse « la kaolinite ».



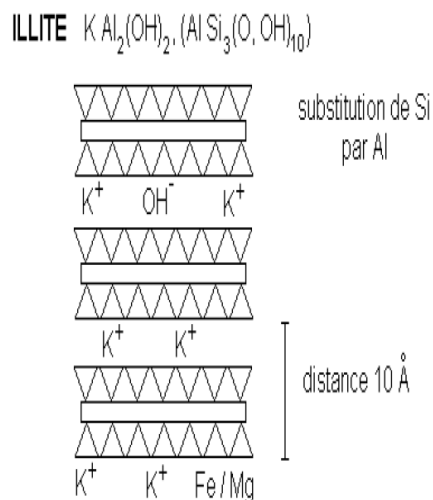
**Figure 1-6:** Schéma de la structure de la kaolinite (d'après Lambe(1953), cité par Holtz, R.D et Kovacs, W.D (1991).)

### - Famille des minéraux à 10 Å :

C'est une famille où chaque feuillet est constitué par une couche octaédrique prise en sandwich par deux couches tétraédriques. C'est l'une des plus importantes par le nombre de variétés et par la fréquence de sa présence dans les sols. Les éléments les plus communs de cette famille, sont en trop, les micas plus ou moins altérés (illites) et la glauconite. L'illite se présente sous forme de feuillets de 10 Å à trois couches.

Ces caractéristiques minéralogiques sont proches de celles des micas d'où l'existence d'intermédiaires illite-mica blanc.

La glauconite correspond à des feuillets de 10 Å dont les plaquettes empilées peuvent donner de petite graine vert jaunâtre ou vert bleu.



**Figure 1-7:** Structure de minérale argileuse (illite).

### - Famille des minéraux à 14 Å :

Cette famille de minéraux se distingue des deux autres, par sa structure composite formée par la superposition de deux feuillets élémentaires, un feuillet à 14 Å de type mica, et d'un feuillet brucitique.

Les éléments apparentant à cette famille sont appelés généralement les chlorites vrais, qui sont caractérisés par une équidistance stable, du fait que le feuillet brucitique est électriquement chargé.

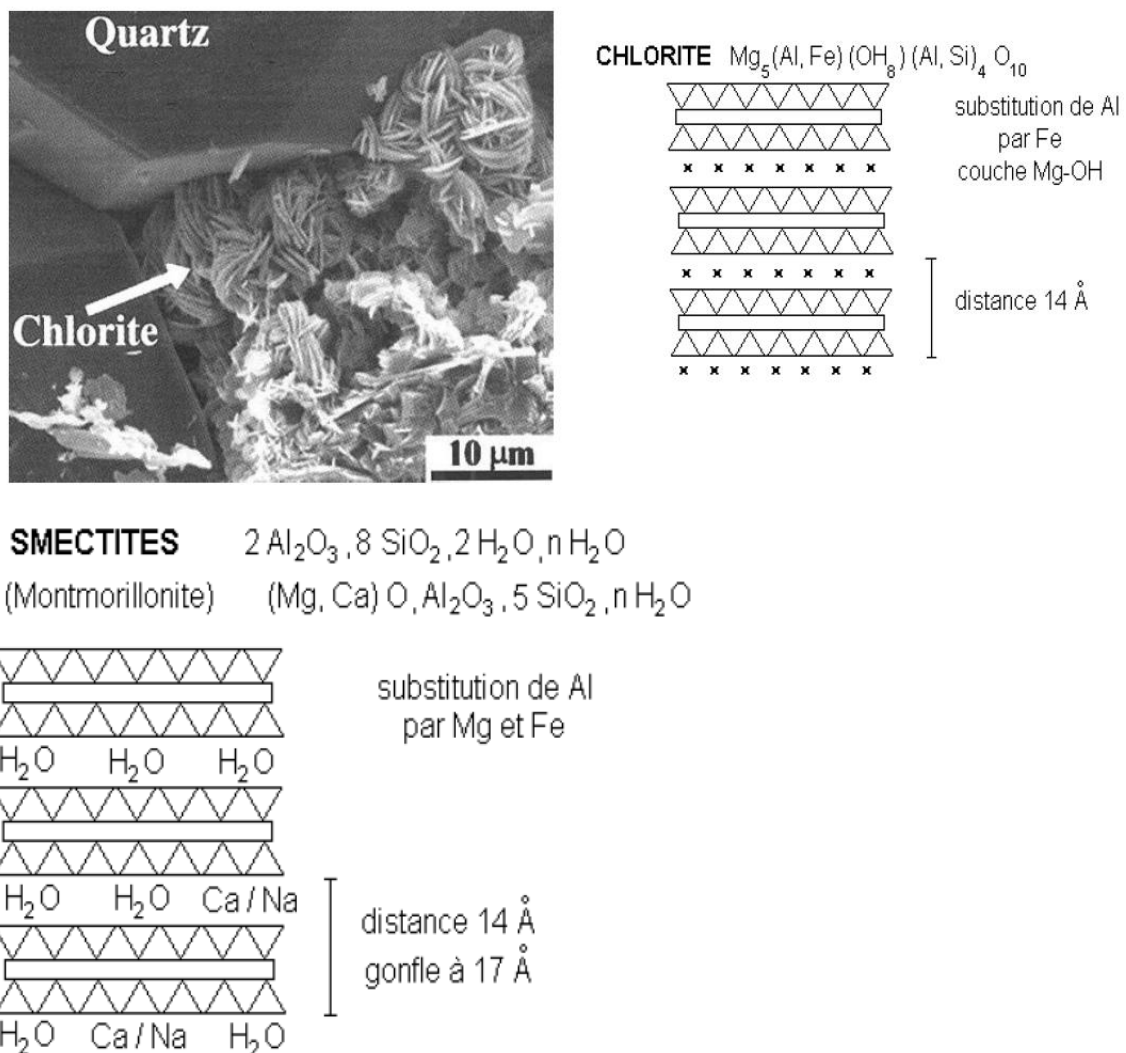
Lorsque ces chlorites présentent un déficit de charge, la substitution peut se faire par la présence des cations hydratés entre deux feuillets. Ce qui conduit à des chlorites gonflants.



➤ **Montmorillonite :**

La montmorillonite ou smectites est un minéral argileux abondant qui a été découvert à Montmorillonite, en France (Vincent R, Denis T 1997).

La montmorillonite, est un minéral argileux important composé de deux feuillets de silice et d'un d'alumine. Les feuilles en confondent avec les hydroxyles du feuillet en octaèdre pour ne former qu'une seule couche. Les forces de van der Waal qui soudent les sommets des feuillets de silice sont faibles, cela se traduit par une déficience en charge négative nette dans le feuillet en octaèdre.[3]



**Figure 1-8 :** structure de minéraux argileux (Chlorite, la montmorillonite).

### 1-2-7 Minéraux interstratifiés :

L'épaisseur du feuillet est variable. Ces minéraux résultent du mélange régulier ou irrégulier d'argiles appartenant aux groupes ci-dessus.

La valeur de la charge permanente du feuillet a servi de critère pour établir une classification des phyllosilicates 2/1 (Tableau 1-1). Cette classification est déduite des travaux de McKenzie (1975) et Bridley (1996).

**Tableau 1-1** : Classification des minéraux argileux selon la charge globale du feuillet et de la composition de sa couche octaédrique.

Feuillet	Charge par maille	Diocatédrrique	Trioctatédrrique
1 : 1	0	Kaolinite (Si <sub>4</sub> )(Al <sub>4</sub> )O <sub>10</sub> (OH) <sub>8</sub>	Antigorite (Si <sub>4</sub> )(Mg <sub>3</sub> )O <sub>10</sub> (OH) <sub>8</sub>
	0		Bertherines (Si <sub>4-x</sub> Al <sub>x</sub> )(Mg <sup>2+</sup> <sub>6-x</sub> )O <sub>10</sub> (OH) <sub>8</sub>
	0	Pyrophyllites (Si <sub>8</sub> )(Al <sub>4</sub> )O <sub>20</sub> (OH) <sub>4</sub>	Talc (Si <sub>8</sub> )(Mg <sub>6</sub> )O <sub>20</sub> (OH) <sub>4</sub>
1 : 2	0.4 à 1.2	Montmorillonite (Sig)(Al <sub>4-y</sub> Mg <sub>y</sub> )O <sub>20</sub> (OH) <sub>4</sub> My <sup>+</sup> Beidellite (Sig <sub>x</sub> Al <sub>x</sub> )Al <sub>4</sub> O <sub>20</sub> (OH) <sub>4</sub> Mx <sup>+</sup>	Hectorite (Sig)(Mg <sub>6-y</sub> Li <sub>y</sub> )O <sub>20</sub> (OH) <sub>4</sub> My <sup>+</sup> Saponite (Sig <sub>x</sub> Al <sub>x</sub> )(Mg <sub>6</sub> )O <sub>20</sub> (OH) <sub>4</sub> Mx <sup>+</sup>
	1.2 à 1.8	Illites (Sig <sub>x</sub> Al <sub>x</sub> )(Al <sub>4-y</sub> M <sup>2+</sup> <sub>y</sub> )O <sub>20</sub> (OH) <sub>4</sub> k <sup>+</sup> <sub>x+y</sub>	Vermiculites (Sig <sub>x</sub> Al <sub>x</sub> )(Mg <sub>6-y</sub> M <sup>3+</sup> <sub>y</sub> )O <sub>20</sub> (OH) <sub>4</sub> k <sup>+</sup> <sub>x-y</sub>
	2	Muscovite (Si <sub>6</sub> Al <sub>2</sub> )(Al <sub>4</sub> )O <sub>20</sub> (OH) <sub>2</sub> K <sup>+</sup> <sub>2</sub>	Phlogopite (Si <sub>6</sub> Al <sub>2</sub> )(Mg <sub>6</sub> )O <sub>20</sub> (OH) <sub>2</sub> K <sup>+</sup>
	4	Margarite (Si <sub>4</sub> Al <sub>4</sub> )(Al <sub>4</sub> )O <sub>20</sub> (OH) <sub>2</sub> Ca <sup>2+</sup> <sub>2</sub>	Clintonite (Si <sub>4</sub> Al <sub>4</sub> )(Mg <sub>6</sub> )O <sub>20</sub> (OH) <sub>2</sub> Ca <sup>2+</sup> <sub>2</sub>

### 1-3 Origine des argiles :

#### 1-3-1 Héritage et altération :

Les minéraux argileux résultant de la destruction des roches, peuvent soit resté sur place (argiles résiduelles) soit être transportées sur de longues distances.

En fonction des roches mères et du climat, chaud et humide, l'hydrolyse est poussée, la kaolinite se forme en milieu drainé, les smectites, humide, l'altération est modérée, il apparait des interstratifiés, des illites et chlorites dégradées, de la vermiculite.

### 1-3-2 Transformations des minéraux argileux :

Les minéraux néoformés ou hérités peuvent évoluer pour prendre un nouveau statut en équilibre avec le nouveau milieu. On distingue les transformations par dégradation et par agradation. Ces transformations ont lieu aussi bien au cours de l'altération que de la diagénèse par exemple (kaolinite → chlorite, smectites → illite).

## 1-4 Les argiles du sol :

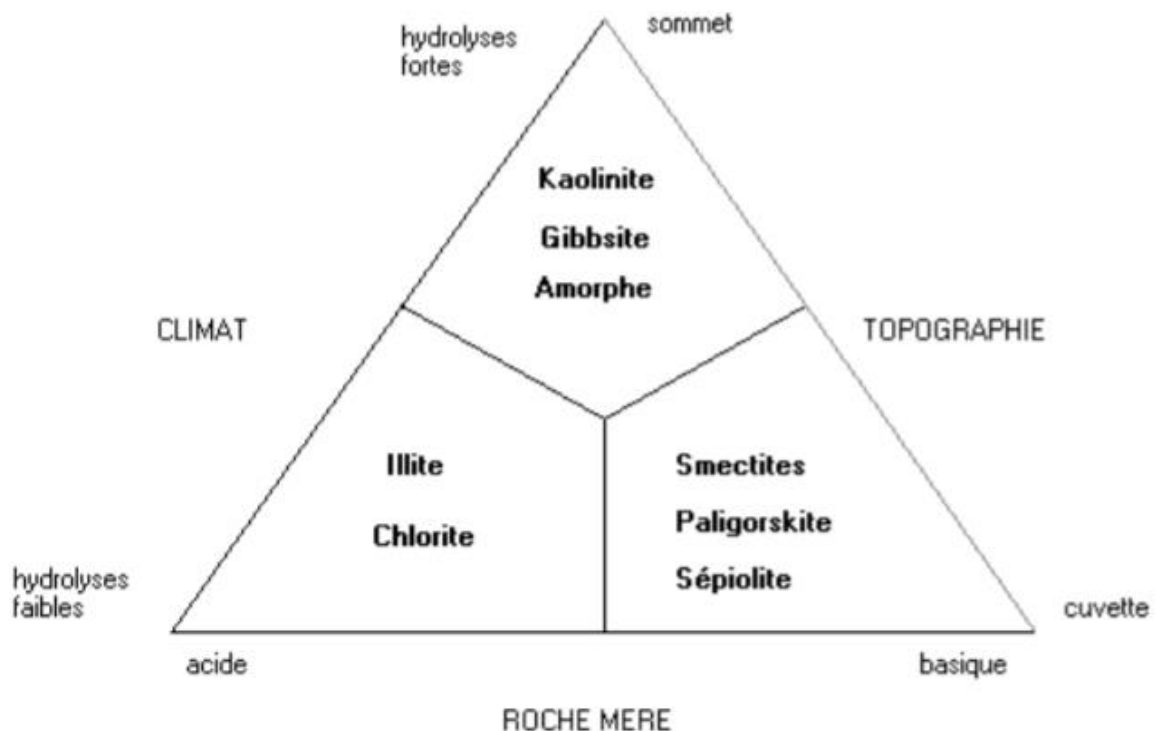
### 1-4-1 Nature des minéraux argileux :

Selon le climat, l'origine des minéraux est variable :

- Héritage : à partir de la roche-mère
- Transformation : à partir des d'autres minéraux argileux
- Néof ormation : formés à partir ions transportés par l'eau du sol.

### 1-4-2 La nature de la roche-mère joue un rôle :

- L'altération d'une roche acide, comme le granite, donne plutôt de la kaolinite
- L'altération d'une roche basique, donne plutôt des smectites.



**Figure 1-9 :** types de phyllosilicates formés au cours de l'altération.[4]

## **1-5 Phénomène de gonflement :**

### **1-5-1 Introductions :**

Lorsque l'on s'intéresse au comportement des sols sous sollicitations mécaniques, il est d'usage de les classer dans deux catégories principales : les sols grenus et les sols fins. Pour les sols fins, constitués en grand partie par des particules d'argile, le comportement mécanique dépend de la teneur en eau de la composition chimique de l'eau interstitielle. Au delà des propriétés mécaniques des constituants solides, il existe donc pour ces matériaux des facteurs physico-chimiques intervenant dans la détermination de leur comportement. Ces interactions physico-chimiques entre les particules d'argile et l'eau interstitielle conduisent à l'apparition d'une force répulsive entre les particules pouvant s'étendre sur des distances considérables.

### **1-5-2 définitions :**

Le gonflement des argiles est thématique qui anime les débats de la communauté scientifique depuis de nombreuses années. Le gonflement dû à l'hydratation des cations échangeables et le gonflement d'origine osmotique lié à la concentration des sels en solution. On constate que ces deux manifestations du gonflement, d'origine différente, étroitement liées à la microstructure de l'argile. En raison de la grande diversité des microstructures d'argiles rencontrées dans la pratique, il convient de préciser la nature de ces microstructures. Dans cet esprit, on commence tout d'abord par présenter la microstructure des 3 principales familles d'argiles rencontrées dans le sous-sol :

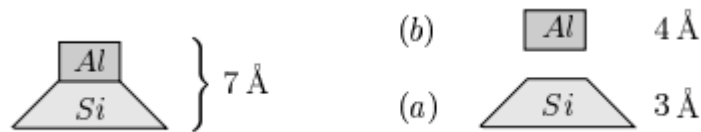
Les kaolinites, les montmorillonites et les illites. On peut estimer que le comportement des autres types d'argiles occupe une position intermédiaire vis-à-vis des comportements présentés.

On s'attache dans la suite à la description du comportement gonflant de ces trois types d'argile.

### **1-5-3 Un aperçu sur la microstructure des argiles :**

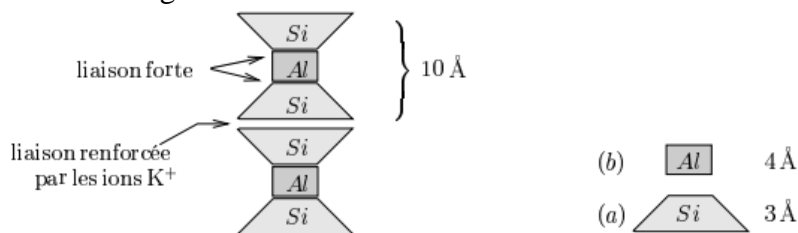
Le gonflement des argiles est précisément contrôlé par l'intensité de ces liaisons inter-feuillets. Une première étape dans l'analyse du comportement gonflant des argiles consiste donc à préciser la nature de ces liaisons pour chacune des 3 familles d'argiles considérées.

- 1- Pour les argiles de la classe des kaolinites, dites « peu gonflantes », une particule d'argile est formée d'un empilement de plusieurs feuillets, ayant chacun une épaisseur approximativement égale  $7\text{\AA}$ , véritablement soudés les uns aux autres sous l'action de forces de liaison importantes.



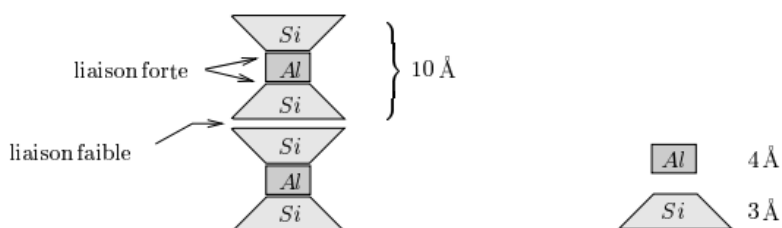
**Figure 1-10 :** un feuillet élémentaire est constitué par l'association de deux unités structurales des base : (a) le tétraèdre silicium, (b) l'octaèdre aluminium (ou magnésium).

- 2- Pour les argiles de la classe des illites, potentiellement gonflantes, les liaisons entre les feuillets sont moins fortes. Toutefois, la présence d'ions potassium  $K^+$  entre les feuillets contribue à renforcer ces liaisons si bien que le comportement des illites se rapproche de celui des kaolinites. Leur géométrie, plus aplatie, préserve néanmoins une tendance au gonflement.



**Figure 1-11 :** un feuillet élémentaire est constitué par l'association de trois unités structurales des base : (a) le tétraèdre silicium, (b) l'octaèdre aluminium (ou magnésium) un autre (a) tétraèdre silicium.

- 3- Pour les argiles de la classe des smectites (montmorillonite essentiellement), potentiellement très gonflantes, les liaisons entre les feuillets sont nettement moins fortes. En effet, le développement de substitutions isomorphes ( $Mg^{2+}$  pour  $Al^{3+}$ ) à la surface ces feuillets entraîne un excès de charges négatives qui se fixent à la surface des feuillets. Afin de rétablir l'électroneutralité, les cations de l'espace interfeuillet, dits cations échangeables, se fixent à la surface des feuillets assurent ainsi la liaison entre les feuillets. L'intensité de ces liaisons dépend à la fois de la valence des cations et du degré d'électronégativité des surface.



**Figure 1-12 :** le feuillet élémentaire est identique à celui observé chez les argiles de la famille des illites.

A la lumière de cette brève présentation, les différentes classes d'argile se distinguent, au niveau de la microstructure, par l'intensité des forces de liaison les feuillets des particules d'argile. Cette différence est en fait à la base de la différence de comportement gonflant entre ces trois familles d'argile.

#### **1-5-4 Définition des paramètres de gonflement :**

En toute rigueur, les paramètres mécaniques à déterminer pour caractériser les terrains gonflants ne sont pas les mêmes selon que l'objectif choisi est d'empêcher le gonflement, ou de s'assurer qu'il se produira de façon progressive ou périodique, ou de construire l'ouvrage après achèvement du processus de gonflement. Les phénomènes physico-chimique et les mécanique intervenant à différentes échelles (auxquels s'ajoutent d'éventuelles modifications de la structure de terrain pendant le gonflement) rendent très difficile la caractérisation des paramètres hydromécaniques des sols gonflements.

Devant cette complexité, c'est une approche macroscopique qui est adoptée dans la pratique quotidienne. Elle distingue trois notions : la pression de gonflement, le gonflement libre et l'indice de gonflement. Ces notions ne peuvent pas être considérées comme des caractéristiques intrinsèques du matériau gonflant et ne peuvent recevoir de définition objective, car elles dépendent des conditions

Dans lesquelles se déroule le gonflement. Elles sont néanmoins très largement utilisées et ont largement influé sur les procédures d'essais en laboratoire.[5]

- La pression de gonflement d'un élément de sol ou de roche, dont l'état physique initial est connu, peut être définie comme l'état de contraintes à exercer pour maintenir son volume constant pendant l'imbibition sans distorsion. Cette définition de la pression de gonflement est la plus usitée mais elle n'est pas la seule.
- Le gonflement libre d'un élément de sol ou de roche, dont l'état physique initial est connu, est la déformation maximale que provoque l'imbibition de cet élément soumis à un état de contraintes nulles ou quasi-nulles.
- L'indice de gonflement traduit l'importance de la déformation de gonflement induit par un déchargement par rapport à un état de contraintes donné. La déformation de gonflement est obtenue au bout d'un temps infini, déduction faite des déformations instantanées dues aux variations.[5]

En principe, ces trois phénomènes sont mesurés sur des éprouvettes en compression isotrope ou œdométrique. Contrairement à la pression de gonflement et au potentiel de gonflement obtenus à la saturation du sol, l'indice de gonflement est issu d'un déchargement mécanique.[5]

### 1-5-4 Méthodes indirectes de caractérisation :

Les méthodes indirectes consistent à déterminer une corrélation entre le gonflement libre ou la pression de gonflement et quelques paramètres géotechniques comme les limites d'Atterberg, la limite de retrait, la teneur en eau, la densité sèche qui semblent être les facteurs influant sur le gonflement des argiles. Ainsi, après avoir déterminé les paramètres géotechniques d'un matériau, l'emploi de formules empiriques permet de connaître rapidement le potentiel de gonflement du terrain, c'est-à-dire estimer si ce potentiel est faible, moyen ou élevé et donc si le phénomène est à prendre en compte ou non. Compte tenu de la structure minéralogique des différents types d'argile, la caractérisation de la surface spécifique d'argile représente aussi un élément essentiel pour identifier le potentiel de gonflement d'un matériau. Quelques approches empiriques sont détaillées ci-après.[5]

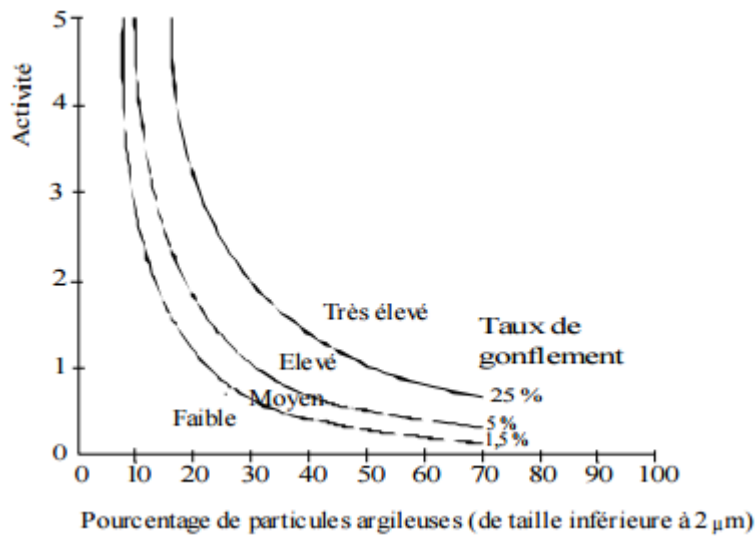
#### - Limites d'Atterberg

L'analyse microscopique a illustré un premier mécanisme physico-chimique d'interaction eau-minéral argileux, qui est celui des molécules d'hydratation des cations échangeables, attirés électriquement par le déficit de charge des feuillets argileux (lui-même dû, entre autres, à certaines substitutions isomorphes). Ce mécanisme met en évidence l'importance des sels dissous dans l'eau interstitielle. Sur un plan macroscopique, ce phénomène est à rapprocher de la notion des limites d'Atterberg. Ainsi, l'indice de plasticité  $I_p = W_L - W_P$  peut s'interpréter comme la quantité d'eau nécessaire pour faire passer un sol de l'état "solide"

( $W < W_P$ ) à l'état "liquide" ( $w > w_L$ ). Plus le sol possède de minéraux actifs dans leur interaction avec l'eau, plus il sera nécessaire d'ajouter de l'eau au sol pour qu'il devienne liquide ; sachant qu'une grande partie de cette eau sera adsorbée par les particules, il ne restera donc pas à l'état liquide et ne conférera pas au matériau un état liquide mais pâteux, correspondant à la phase plastique. Quand toute la capacité d'adsorption du sol sera saturée, alors l'eau en excès restera à l'état libre c'est-à-dire liquide. Ceci rejoint la définition de l'activité de Skempton  $A_c = \frac{I_p}{C_2}$  qui rapporte l'indice de plasticité du matériau à sa teneur en particules argileuses (notée ici  $C_2$ , teneur en particules de dimensions inférieures à 2 mm), la seule interagissant avec l'eau. Cette définition de l'indice de plasticité montre également que  $PI$  est un paramètre important dans les propriétés de rétention d'eau du terrain et donc de gonflement. C'est la raison pour laquelle un certain nombre de corrélations ont rapidement été recherchées entre les limites d'Atterberg et les propriétés de gonflement des sols.

Seed et al. (1962) ont proposé une méthode d'estimation du taux de gonflement sur des sols compactés en se référant à la teneur en argile du sol et à l'activité du matériau  $A_c$

(Figure 1-13).[5]



**Figure 1-13** : Diagramme de classification du potentiel de gonflement (Seed et al, 1962).

Le gonflement libre  $\varepsilon_g$  d'un échantillon, confiné latéralement en présence d'eau sous une surcharge de 7 KPa et préalablement compacté à la teneur en eau optimale et à la densité sèche maximale l'essai de compactage AASHO (norme américaine), peut être relié à l'indice de plasticité  $I_p$  du sol par l'expression suivant :

$$\varepsilon_g = 21.6 \times 10^{-5} (I_p)^{2.44}$$

Cette relation, obtenue par une étude statistique des résultats expérimentaux, s'applique aux matériaux contenant entre 8% et 65% d'argile. La comparaison de cette formule avec les résultats expérimentaux a abouti à une fourchette d'erreur d'environ 33% sur le gonflement libre.

Le tableau 1-2 donne la relation entre le taux de gonflement et l'indice de plasticité.

**Tableau 1-2** : Relation entre le gonflement libre et l'indice de plasticité (Seed, et al. 1962).

Indice de plasticité	$\varepsilon_g$ (%)	Potentiel de gonflement
0-10	0-15	faible
10-20	1.5-5	Moyen
20-35	5-25	Elevé
> 35	> 25	Très élevé



**Tableau 1-3** : classification proposé par Dakshanamurthy et Raman (1973).

Limite de liquidité $W_L$	Classification
0-20	Non gonflant
20-35	Gonflement faible
35-50	Gonflement moyen
50-70	Gonflement élevé
70-90	Gonflement très élevé
> 90	Gonflement critique

- **Limite de retrait :**

Les sols argileux présentent un retrait volumique lors de l'évaporation de l'eau interstitielle. Le retrait volumique évolue de manière linéaire en fonction de la teneur en eau  $W$  jusqu'à une teneur en eau  $W_R$  définie comme la limite de retrait. A partir de cette limite  $W_R$ , le sol perd de l'eau sans grande variation de volume, il se désature. La limite de retrait et l'indice de retrait  $I_R = W_L - W_R$  apparaissent aussi comme des éléments fondamentaux pour l'étude des variations de volume des sols.

Altemeyer, W. (1955) a proposé une classification des sols fonction de la limite de retrait (tableau 1-4).

**Tableau 1-4** : relation entre potentiel de gonflement et limite de retrait (Altemeyer, 1955).

$W_R$	Potentiel de gonflement
< 10	Fort
10-12	Critique
>12	Faible

- **l'essai au bleu de méthylène :**

Cet essai est fait systématiquement pour tout sol dont la fraction argileuse dépasse 15 à 20%. Il consiste à déterminer la quantité de bleu de méthylène nécessaire pour adsorber les particules argileuses. Suivant la surface spécifique des grains, la quantité sera plus ou moins grande. En effet, une argile de la famille des montmorillonites (qui a un potentiel de gonflement élevé) a une surface spécifique de 150 à 800 m<sup>2</sup>/g, tandis qu'une kaolinite (dont le potentiel de gonflement est quasi-nul) a une surface spécifique de 10 à 20 m<sup>2</sup>/g (Mouroux et al, 1988). De ce fait, une valeur de bleu dépassant 6 indique un sol à potentiel de gonflement fort (Zerhouni et al, 2002).

Bigot et Zerhouni (2000) ont cité une classification d'estimation du taux de gonflement des sols en fonction de  $V_{BS}$  la valeur au bleu de méthylène, le pourcentage des particules dont le diamètre est inférieur 80 $\mu$ m et l'indice de plasticité  $I_P$  (tableau 1-5)

**Tableau 1-5** : valeurs indicatives pour les sols susceptibles de variation de volume (Bigot et Zerhouni, 2000)

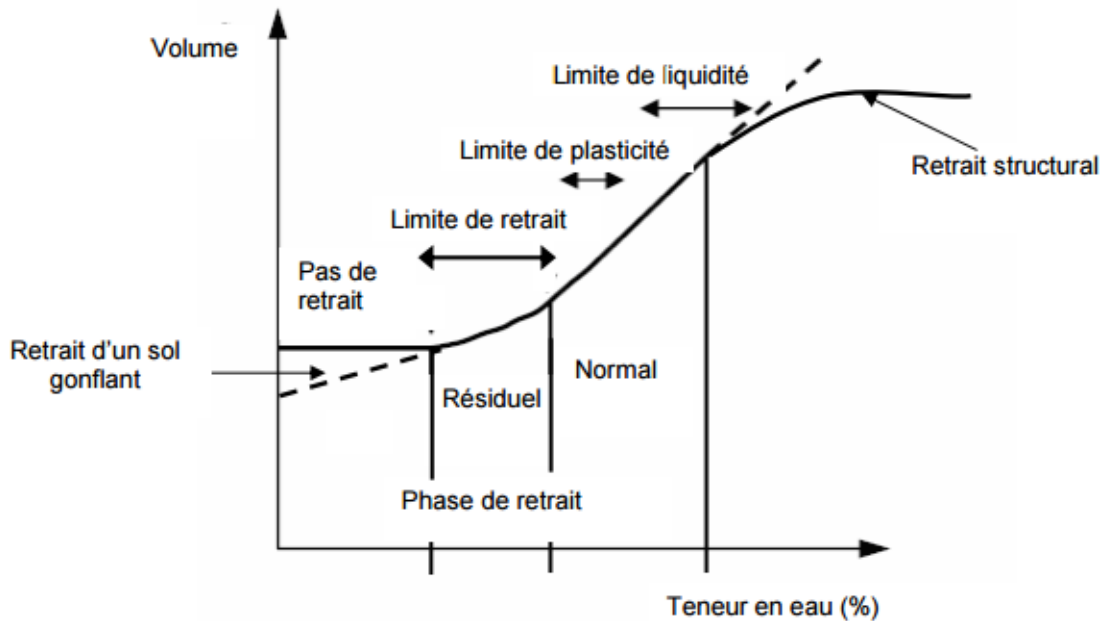
$I_p$	$\% < 80\mu m$	$V_{BS}$	Susceptibilité de variation de volume du sol
$> 30$	$> 90$	$> 6$	Fort
$15 < I_p < 30$	$> 50$	$2 > V_{BS} > 6$	Moyen
$< 15$	$< 50$	$< 2$	Faible

### 1-6 Retrait des sols gonflants :

Le retrait consiste une diminution du volume du sol due à l'évaporation de l'eau présente dans ses pores. L'assèchement progressif du sol provoque des tensions capillaires et la formation de ménisques autour des particules du sol. Les tensions capillaires sont à l'origine de contraintes de cisaillement. Plus l'eau s'évapore, plus les tensions capillaires augmentent et plus le rayon des pores diminue (équation Jurin-Laplace). Parallèlement, la résistance à la traction du sol augmente. Quand cette résistance atteint les contraintes engendrées par les tensions capillaires, le retrait s'arrête, le volume du sol ne diminue plus. La teneur en eau pour laquelle le retrait cesse correspond à la limite de retrait.

Le déroulement du retrait peut être décrit en trois phases, en fonction de la diminution du volume d'eau et de sol : retrait normal, retrait résiduel et absence de retrait qui sont montrés sur courbe de retrait (figure 1-14) (Nowamooz H, 2007).

- Retrait normal : la diminution du volume du sol est égale au volume d'eau perdu, dans cette phase, le sol est toujours saturé et donc, l'air n'entre pas dans les pores.
- retrait résiduel : une fois la limite de retrait atteinte, l'air entre et occupe les vides du sol (point d'entrée d'air), de telle sorte que la diminution du volume de sol est beaucoup plus faible que le volume d'eau perdue.
- L'absence de retrait : le volume du sol ne peut plus varier du fait de l'agencement des particules, mais l'eau continue de s'évaporer.[5]



**Figure 1-14:** Courbe de retrait classique

Le retrait évolue de manière linéaire jusqu'à une teneur en eau définie comme la limite de retrait ( $w_R$ ). A partir de cette limite, le sol perd de l'eau sans grande variation de volume.

On considère la limite de retrait comme l'intersection de deux segments présentant le retrait normal et l'absence de retrait. Le coefficient de retrait (RI) est égal à la pente de la droite du graphe qui représente la variation relative de hauteur en fonction de la teneur en eau (Figure 1-14).

Dans les sols naturellement structurés, il y a aussi une quatrième phase appelée retrait structural (Figure 1-14). Le volume d'eau perdu est supérieur à la diminution du volume de sol (Yule & Richie, 1990). Les sols restructurés n'ont pas cette étape (Bronswijk, 1988).

Pour les sols gonflants, les variations de volume continuent même pour les teneurs en eau inférieures à celles de limite de retrait.

Différents types d'essais de dessiccation (Philipponnat 1991, Biarez et al. 1988 AFNOR XP P94-060 parties 1 et 2) sont réalisés pour caractériser la déformation ou le retrait des sols argileux. Toutefois, ces essais ne conduisent pas toujours aux mêmes caractéristiques. En outre, certains essais tendent à disparaître, en raison de problèmes pratiques posés par leur mise en œuvre (par exemple, l'utilisation de produits dangereux comme le mercure).

Chapitre 2 :  
Identification,  
classification  
et  
caractérisation  
des sols

## 2-1 Identification des sols :

### 2-1-1 Introduction :

Identifier un sol, c'est déterminer un ensemble de propriétés physiques, mécaniques ou chimiques qui permettent de le caractériser. Ces propriétés sont déterminées par des essais simples et rapides, appelés « essais d'identification ».

Les essais d'identification conduisent à une description précise et chiffrée, et non seulement descriptive, du sol. Une définition chiffrée est nécessaire car des sols d'aspects très voisins peuvent présenter des comportements (mécaniques, en particulier) très différents.

Les essais d'identification servent de base aux divers systèmes de classification des sols. Leurs résultats permettent aussi d'estimer au moyen de corrélations des ordres de grandeur des propriétés mécaniques des sols et d'établir un prédimensionnement grossier des ouvrages au stade des premières études.

On distingue classiquement deux grandes catégories d'essais d'identification :

Les essais qui répondent de l'arrangement et de la répartition des phases (squelette solide, eau, air). Ces essais caractérisent l'état du sol et ne peuvent être réalisés que sur des échantillons intacts ;

Les essais qui traduisent les propriétés des particules du sol et l'intensité de leurs liaisons avec l'eau. Ces essais caractérisent la nature du sol et sont réalisés sur des échantillons intacts ou remaniés (dont l'état a été perturbé lors du prélèvement ou du transport).

Identifier un sol c'est connaître sa nature, sa composition et la répartition des grains de différentes tailles qui le compose. Ces propriétés sont déterminées par des essais normalisés appelés essais géotechniques dont les plus répandus sont : analyse granulométrique, limite d'atterberg, bleu de méthylène.

## 2-1-2 Description des essais

### 2-1-2-1 limite d'atterberg : (NF P94-051/ NF P94-052-1)

– **DOMAIN D'APPLICATION :**

- détermination des deux limites d'atterberg (limite de liquidité à la coupelle et limite de plasticité du rouleau) s'applique aux sols dont les éléments passent à travers le tamis de dimension nominale d'ouverture de maille 400 $\mu$ m.
- Cette norme destinée à la détermination des deux limites d'atterberg (limite de liquidité à la coupelle et limite de plasticité du rouleau) s'applique aux sols dont les éléments passent à travers le tamis de dimension nominale d'ouverture de maille 400 $\mu$ m.

– **APPAREILLAGE :**

• **Matériel pour la préparation du sol :**

- un récipient d'eau.
- un bac.
- un tamis 0.4 mm.

• **Matériel pour la limite de liquidité:**



**Figure 2-1:**Un appareil de casagrande se compose

- D'un socle.



**Figure2-2 :**D'un support métallique.

- D'une coupelle en laiton chromé amovible
- Un outil à rainurer.



Figure2-3 : Une étuve.



Figure2-4 : Une balance.



Figure 2-5: Une spatule.

- **Matériel de la limite de plasticité:**



Figure 2-6 : Une plaque lisse en marbre. Figure 2-7 : Une plaque de verre.

- Une étuve.
- Une balance.

- **Mode opératoire :**

**1- Détermination de Limite de Liquidité avec la limite d'atterberg :**

- ▶ La totalité de tamisât est malaxée afin d'obtenir une pâte homogène et presque fluide.
- ▶ Répartir avec la spatule dans la coupelle une masse d'environ 70g de pâte.



**Figure 2-8 :** La pâte recouvre le fond de la coupelle, sauf sur une partie d d'environ 3cm.

- ▶ Partager la pâte en deux, au moyen de l'outil de rainurer.
- ▶ Actionner la came de façon à soumettre la coupelle à une série de chocs à la cadence de 2coups par seconde.
- ▶ Noter le nombre N de chocs nécessaires pour que les lèvres de rainure se rejoignent sur une longueur d'environ 1 cm.
- ▶ L'essai n'est poursuivi que lorsque N compris entre 15 et 35.
- ▶ Prélever dans la coupelle, à l'aide d'une environ 5g de pâte de chaque côté de lèvres afin d'en déterminer la teneur en eau. [6]

**– Détermination de limite de liquidité avec le cône pénétration :**

- ▶ Régler l'horizontalité de socle.
- ▶ Nettoyer la pointe du cône.
- ▶ Malaxer la pâte sur la plaque lisse pour obtenir une pâte homogène presque fluide.
- ▶ Remplir le récipient normalisé avec spatule de cette pâte.
- ▶ Araser afin d'obtenir une surface lisse et plane.
- ▶ Ajuster la pointe normalisé à peu près au centre du récipient et pour qu'elle affleure la surface du sol.
- ▶ Repérer la position du cône.
- ▶ Libérer le cône et le laisser s'enfoncer dans le sol pendant 5s.



**Figure 2-9 :** Noter sa nouvelle position l'enfoncement h doit être comprise entre 12 et 25 mm.



- ▶ Enlever le cône faire un prélèvement et mesurer sa teneur en eau **W**.
- ▶ Recommencer les opérations au moins 4 fois avec des teneurs en eau différentes.

## 2- Détermination de limite de plasticité:

- Former une boulette à partir de la pâte préparée.



**Figure 2-10:** Rouler la boulette sur une plaque lisse de façon à partir de obtenir un rouleau de 3mm de diamètre et de 10 cm de longueur.

- La limite de plasticité est obtenue lorsque le rouleau se fissure.
- Introduire dans l'étuve et déterminer la teneur en eau.

### 2-1-2-2 Analyse granulométrique par voie humide :

- Objectif :

Identifier le pourcentage en masse des différents éléments d'un sol dont les dimensions sont supérieures à 0.08 mm. Cet essai est quantitatif et ne donne aucune indication sur la nature minéralogique de ces grains.

- Appareillage :



**Figure 2-11 :** Série de Tamis (20 ; 10 ; 5 ; 2 ; 1 ; 0,4 ; 0,2 ; 0,1 ; 0,08).



**Figure 2-12 :** Balance



**Figure 2-13** : Une étuve ventilée à température réglable à 105°. Un minimum de 3 bacs.

– **Mode opératoire :**



**Figure 2-14** : Le poids de 500g d'argile



**Figure 2-15:** Prendre l'échantillon  $m_h$  et le laisser tremper au préalable pendant 2 à 24 heures.

- Poser le tamis de 20 mm dans un bac pouvant recueillir le tamisat, l'eau de trempage et les eaux de lavage.
- Tamiser à 0,08 mm et conserver les refus et éventuellement une partie des passés pour l'essai de sédimentomètre.
- Prendre le récipient temporaire contenant les refus de tamisage et le placer à l'étuve pour séchage jusqu'à obtention d'une masse constante, on considérera que la masse est constante lorsque deux pesées successives effectuées à 24h.

- Les masses des différents refus ou des passants sont rapportées à la masse initiale du matériau soumis à essais. les pourcentages sont exploités et complétés par d'autre paramètre en vu de définir la classe de matériau à laquelle appartient l'échantillon.[8]



Figure 2-16: analyse granulométrique par voie humide.

### 2-1-2-3 Par sédimentométrie

- **Objectif :** détermination de la distribution pondérale de la taille des particules fines d'un sol.
- **Appareillage :**



Figure 2-17 : Un Tamis 0,08.



Figure 2-18: Balance

➤ Bac.

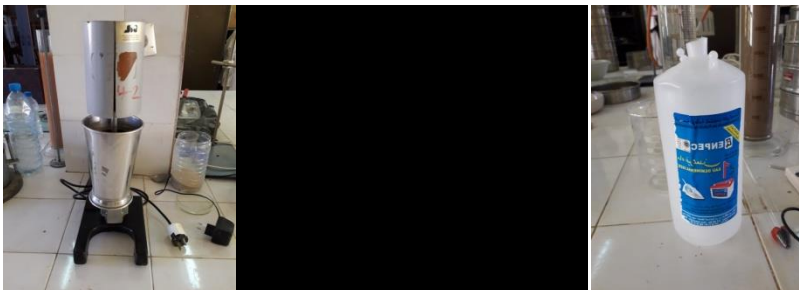


Figure 2-19: Agitateur mécanique.

Figure 2-20: Eau distillée ou

Déminéralisée et défoculant Eprouvette 1L



Figure 2-21 : Produit (hexamétaphosphate de sodium).



Figure 2-22 : Un thermomètre.



- Figure 2-23 : Densimètre.
- Un chronomètre.



Figure 2-24: Étuve

### - Mode opératoire :

S'assurer, avant de commencer l'essai, que la tige du densimètre est parfaitement propre, ce qui est très important pour la formation complète du ménisque. Ne jamais saisir, en cours d'essai, le densimètre autrement qu'à l'extrémité supérieure de la tige.

Avant de plonger le densimètre, agiter vigoureusement la suspension pour obtenir une concentration uniforme sur toute la hauteur de l'éprouvette. Retirer l'agitateur et déclencher au même moment le chronomètre, puis plonger lentement le densimètre. Faire les lectures au sommet du ménisque. Noter le nombre R c'est-à-dire le nombre de divisions à partir de la graduation 1000 affectée de signe + pour les lectures supérieures à 1000.

Les lectures sont faites à : 30 s, 1min, 2, 5, 10, 20, 40, 80, 240, (et éventuellement à 1440 min, soit après 24 heures), ces temps étant tous comptés, à partir du début de l'essai. [9]



Figure 2-25 : Sédimentométrie

#### 2-1-2-4 Essai bleu de méthylène :

##### 3-1 Objectif :

L'essai mesure la capacité des fines d'un sol à absorber du bleu de méthylène à la surface externe et interne des particules étudiées.

##### - Appareillage :



Figure 2-26: Un agitateur.



Figure 2-27: Solution de bleu méthylène et balance

- Papier filtre.
- Une tare.
- Bécher.

##### - Mode opératoire :

##### ▪ Préparation de l'échantillon :

- l'essai s'effectue sur la fraction du matériau qui passe le tamis de 0,08 mm. On peut donc récupérer le tamisat (on passant) 0,08 mm de tamisage par voie humide.
- On place 30 g de ces éléments secs inférieurs à 0,08 mm dans le bécher, mélangés avec 100 cm<sup>3</sup> d'eau déminéralisée ou distillée.
- L'agitateur à ailettes est plongé dans la suspension pour soumettre l'échantillon à une agitation permanente de 5 min à 600 tr/mn, puis à une agitation de 400 tr/mn pendant toute la durée de l'essai

▪ **Exécution de l'essai :**

- On injecte des doses successives de  $\text{cm}^3$  de la solution de bleu de méthylène dosée à 10g/l.
- Après chaque injection d'une dose de bleu, on attende 1 min puis, à l'aide de la baguette de verre on prélève une goutte de liquide que l'on dépose sur un papier filtre. La tache ainsi formée se compose d'un dépôt central de matériau. Coloré d'un bleu généralement soutenu, entouré d'une zone humide qui forme une auréole incolore. Tant que l'auréole est entièrement absorbée par argile, le test est négatif, lorsque l'auréole se colore de manière persistante en bleu clair, le test est dit positif. [10]



**Figure 2-28:** essai de bleu méthylène.

- Si au bout de 5 min le test est toujours positif, le dosage est considéré comme terminé.



**Figure 2-29 :** résultat de test bleu méthylène.

## 2-2 Classification des sols :

### 2-2-1 Introduction :

Les systèmes de classification des sols sont ont pour but de ranger les sols en familles présentant les mêmes caractéristiques géotechniques ou des caractéristiques très voisines. Ils permettent donc de grouper les très nombreux échantillons recueillis au cours d'une campagne de sondages et d'établir des coupes géotechniques du terrain.

Ces coupes sont précieuses pour l'ingénieur. Elles viennent compléter les données de la géologie, qui n'entraînent pas celles de la géotechnique : des sols de même origine géologique peuvent avoir des propriétés géotechniques très différentes, et réciproquement.

### 2-2-2 But de la classification :

Pour résoudre les problèmes de mécanique des sols, il est important de caractériser un sol mais aussi de les classer, c'est à dire de les mettre dans un groupe ayant des comportements similaires. Il existe de par le monde de nombreuses classifications. En général, le simple Identification visuelle permet de donner un nom au matériau : marne bleue, argile jaune, sable fin,

### 2-2-3 Principe de classification :

Les systèmes de classification des sols sont nés du besoin des ingénieurs civils de disposer de renseignements suffisamment fiables sur le comportement des sols pour pouvoir prendre des décisions rapides et efficaces, surtout dans les domaines de construction routière et des infrastructures des pistes d'atterrissage ou des barrages. Les systèmes de classification des sols ont pour but de ranger les sols en familles présentant les mêmes caractéristiques géotechniques ou des caractéristiques très voisines. Ils permettent de grouper de très nombreux échantillons recueillis au cours d'une campagne de sondages et d'établir des coupes géotechniques du terrain.

Ces coupes sont précieuses pour l'ingénieur. Elles viennent compléter les données de la géologie, qui n'entraînent pas celles de la géotechnique : des sols de même origine géologique peuvent avoir des propriétés géotechniques très différentes, et réciproquement. Cependant, un système de classification ne peut remplacer ni la reconnaissance géotechnique sur le site ni les essais de mesure des propriétés mécaniques du sol, sur place ou en laboratoire. Il existe de très nombreux systèmes de classification des sols :

— les uns sont basés sur l'aptitude du sol pour un emploi particulier du génie civil. Ces classifications présentent en général l'inconvénient de ne pouvoir être étendues à d'autres usages que celui pour lequel elles ont été établies ;

— les autres sont basés sur certains essais d'identification. Parmi ces systèmes, plusieurs se réfèrent uniquement à la granularité du sol (diagramme triangulaire, par exemple) et diffèrent par les seuils granulométriques adoptés. D'autres utilisent simultanément la granularité et la plasticité du sol. On décrira ici l'une de ces classifications, dite « classification des laboratoires des ponts et chaussées » ou « classification LPC », qui n'est autre que la classification USCS (Unified Soil Classification System), adaptée aux seuils granulométriques utilisés en France (1965), puis la classification LPC modifiée pour mieux décrire les sols contenant des matières organiques (1974/1980). La classification des sols pour les terrassements routiers, qui est utilisée en France pour les études de terrassements et est souvent utilisée dans les rapports d'études géotechniques de tracés, sera ensuite présentée. [11]

### 2-2-4 Nombreuses classifications dans différents pays :

- Classification U.S.C.S (Unified Soil Classification System) établie par Casagrande ;



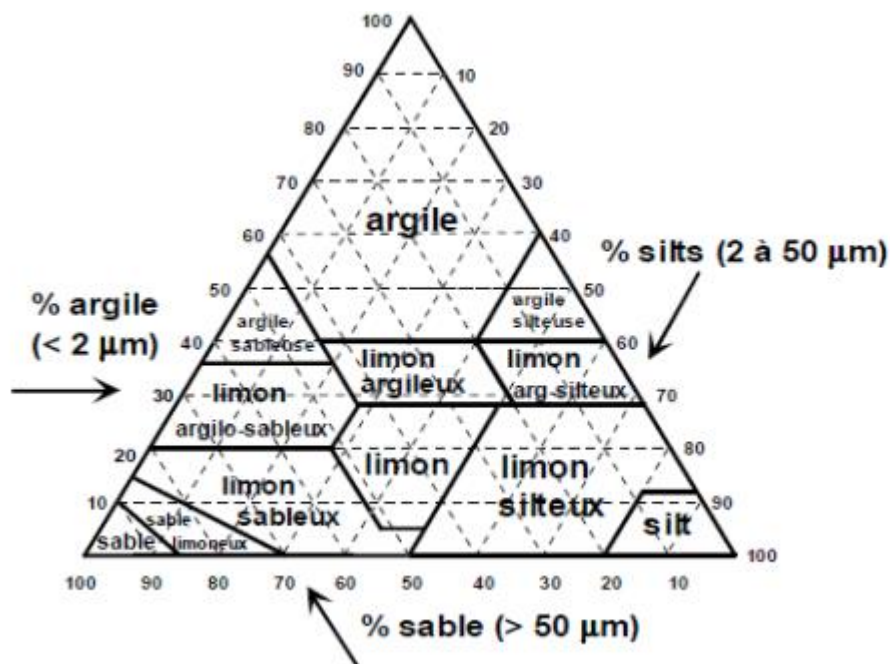
- Classification **L.C.P.C** (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées) identique à la classification **U.S.C.S** ;
- Classification **A.A.S.H.O** (American Association State Highways Officials);
- Classification **G.T.R** (Guide des terrassements routier).

### 2-2-5 Classification triangulaire :

Les systèmes de classification triangulaire prennent la forme de triangles dont les côtés portent des échelles représentant les proportions de sable, de silt et d'argile mesurées sur un échantillon de sol. (Fig.5-2)

Ces triangles sont divisés en zones portant une appellation conventionnelle selon les proportions relatives des types de sols. Seules les échelles des proportions d'argile, de sable et de silts (limon) figurent sur le triangle.

Utilisons le diagramme de la figure.5-2 pour classer un sol comportant 41% d'argile, 42% de sable et 17% de silt, c'est-à-dire un sable argileux avec un peu de silt. C'est le point sur le diagramme qui correspond à ces proportions, mais il est situé dans la zone des argiles ; on attribue donc à ce sol l'appellation d'argile, malgré que sa fraction argileuse ne soit pas la plus grande. La classification triangulaire reconnaît ainsi l'importance de la matrice argileuse dans le comportement des sols. [11]



**Figure 2-30:** Classification triangulaire des sols fins (contenant moins de 30% d'éléments de diamètre supérieur à 2 mm).



### 2-2-6 Classification (LPC/USCS) des sols :

La classification LPC (1965) utilise les résultats d'essais classiques d'identification des sols :

Des critères granulométriques :

— les pourcentages de gravier, sable et particules fines (tamisat à 2mm et 0,08 mm);

— la forme de la courbe granulométrique :

- coefficient d'uniformité ou de Hazen  $C_u$ ,
- coefficient de courbure  $C_c$  ;

Les caractéristiques de plasticité  $w_L$  et  $IP$ , et la ligne A d'équation :

$$IP = 0,73 (w_L - 20) \quad (\text{relation de Casagrande}) ;$$

La teneur en matières organiques.

—La classification peut également s'effectuer à partir de l'observation visuelle Du sol et de tests simples de chantier. Mais il faut une grande expérience Pour appliquer correctement cette méthode de classification de chantier.

#### - La classification des sols fins :

La classification des sols fins utilise les critères de plasticité liés aux limites d'Atterberg. Elle est précisée dans le diagramme de plasticité ci-après figure 2-31. Selon la position dans le diagramme du point représentatif ayant pour abscisse la limite de liquidité et pour ordonnée l'indice de plasticité, on définit quatre grandes catégories principales:

- Les limons très plastiques :  $L_t$
- Les limons peu plastiques :  $L_p$
- Les argiles très plastiques :  $A_t$
- Les argiles peu plastiques :  $A_p$

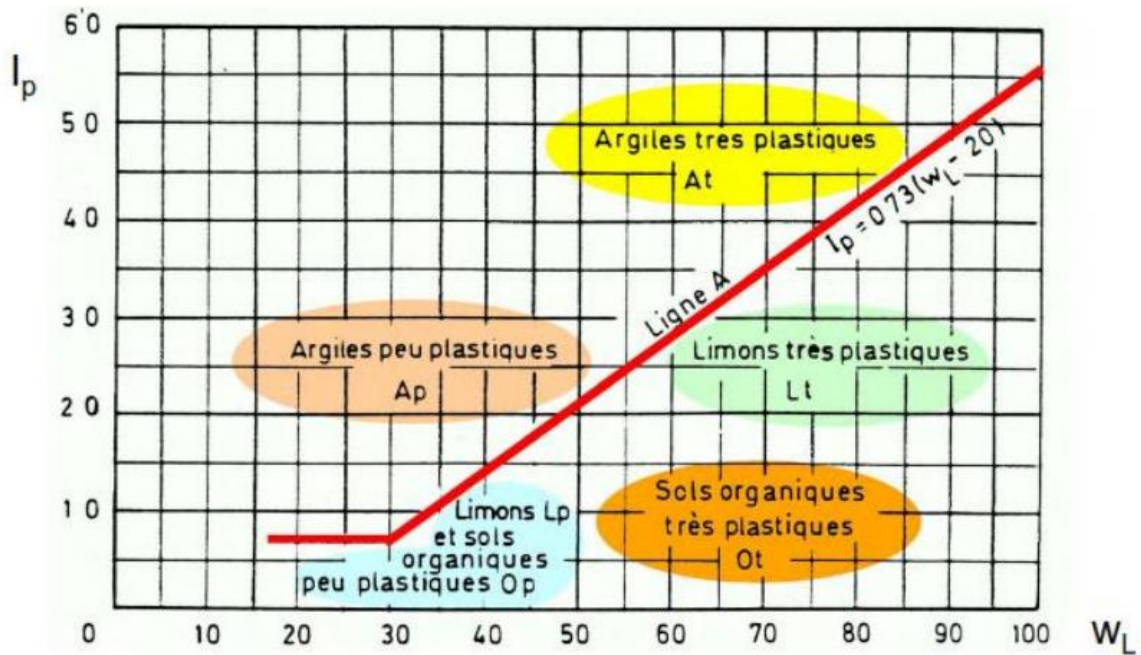


Figure 2-31 : Abaque de plasticité de Casagrande. Classification LC PC des sols fins.

– **Sols grenus :**

La classification des sols grenus se fait par la granulométrie et les limites d'Atterberg. Elle est précisée dans le tableau ci-après (Tableau 2-1)

**Tableau 2-1:** Classification des sols grenus (plus de 50 % d'éléments > 0,08 mm)

Définitions		Symbole LPC (USCS)	Conditions	Appellations	
Graves	plus de 50% Des éléments > 0,08mm ont un diamètre >	moins de 5% d'éléments < 0,08 mm	Gb (GW)	$Cu = D_{60}/D_{10} > 4$ et $1 < Cc = (D_{30})^2/D_{10}D_{60} < 3$	Grave propre bien graduée
			GM (GP)	Une des conditions de Gb n'est pas satisfaite	Grave propre mal graduée
	Plus de 12% d'éléments < 0,08 mm	GL (GM)	Limites d'Atterberg au-dessous de la ligne A	Grave limoneuse	
		GA (GC)	Limites d'Atterberg au-dessus de la ligne A	Grave Argileuse	
Sable	plus de 50% des éléments > 0,08mm ont un diamètre < 2mm	Moins de 5% D'éléments < 0,08mm	Sb (SW)	$Cu = D_{60}/D_{10} > 6$ et $1 < Cc = (D_{30})^2/D_{10}D_{60} < 3$	Sable propre bien gradué
		Plus de 12% d'éléments <0,08 mm	SL (SM)	Une des conditions de Sb n'est pas satisfaite	Sable propre mal gradué
	Sm (SP)		Limites d'Atterberg au-dessous de la ligne A	Sable limoneux	
	SA (SC)		Limites d'Atterberg au-dessus de la ligne A	Grave Argileux	
Lorsque la teneur en particules fines (< 0,08 mm) est comprise entre 5% et 12% on utilise un double symbole. Par exemple : Sb-SL					

### 2-2-7 Classification LPC modifiée :

Les modifications apportées à la classification LPC/USCS portent exclusivement sur la description des sols organiques (teneur en matières organiques supérieure à 3 %). Seuls les sols comportant moins de 10 % de matières organiques continuent d'être classés comme les sols fins. Pour les teneurs en matières organiques plus fortes, l'accent est mis sur le degré de décomposition (d'humification) des fibres organiques, évalué au moyen du test de Von Post. La classification débouche sur vingt-deux types de sols, qui

- des sols grenus (Gb, GM, GA, GL, Sb, SM, SA, SL), sols fins (At, Ap, Lt, Lp), des sols faiblement organiques (FO-At, FO-Ap, FO-Lt, FO-Lp), des sols moyennement organiques : mo-a, mo-sf, mo-f
- des sols très organiques : tO-a, tO-sf, tO-f, des sols moyennement organiques, des sols très organiques.

Les symboles des sols grenus et des sols fins sont les mêmes que dans la classification LPC/USCS. Pour les sols organiques, les symboles : a, SF et f signifient « à matière organique amorphe », « à matière organique semi fibreuse » et « à matière organique fibreuse ». L'Annexe 2 présente le schéma général de la classification des sols LPC modifiée (1974/1980), et détaille les modifications apportées par rapport à la classification LPC/USCS

### 2-2-8 la classification GTR :

Cette classification est la seule présentant un réel intérêt pratique et utilisée dans les travaux de terrassement. Son utilisation est détaillée dans le Guide technique pour la réalisation des remblais et des couches de forme ; C'est pour cette raison qu'elle est désignée par classification GTR. Cette classification, définit des classes de sols corrélées avec l'aptitude au compactage des matériaux en fonction des conditions de chantiers et leur comportement mécanique ultérieur. Elle tient compte des mêmes caractéristiques de base que la classification LPC/USCS, mais elle est beaucoup plus précise pour les particules argileuses, qui ont une grande influence sur la conduite des terrassements, et tient compte de l'altérabilité des matériaux au cours du temps. Les principes généraux de cette classification sont présentés sur la tableau 2-2. La classification détaillée est décrite dans un guide technique du LCPC et du SETRA et dans la norme NF P 11-300.

On distingue 3 familles :

- Les **sols** de classe : A, B, C et D
- Les **matériaux rocheux** de classe : R
- Les **sols organiques et sous-produits industriels** de classe : F

Les 4 classes de sols (famille 1) :

- Classe A : sols fins
- Classe B : sols sableux et graveleux avec fines
- Classe C : sols comportant des fines et des gros éléments
- Classe D : sols insensibles à l'eau.

Tableau 2-2 : La classification GTR pour les sols A, B, C et D.

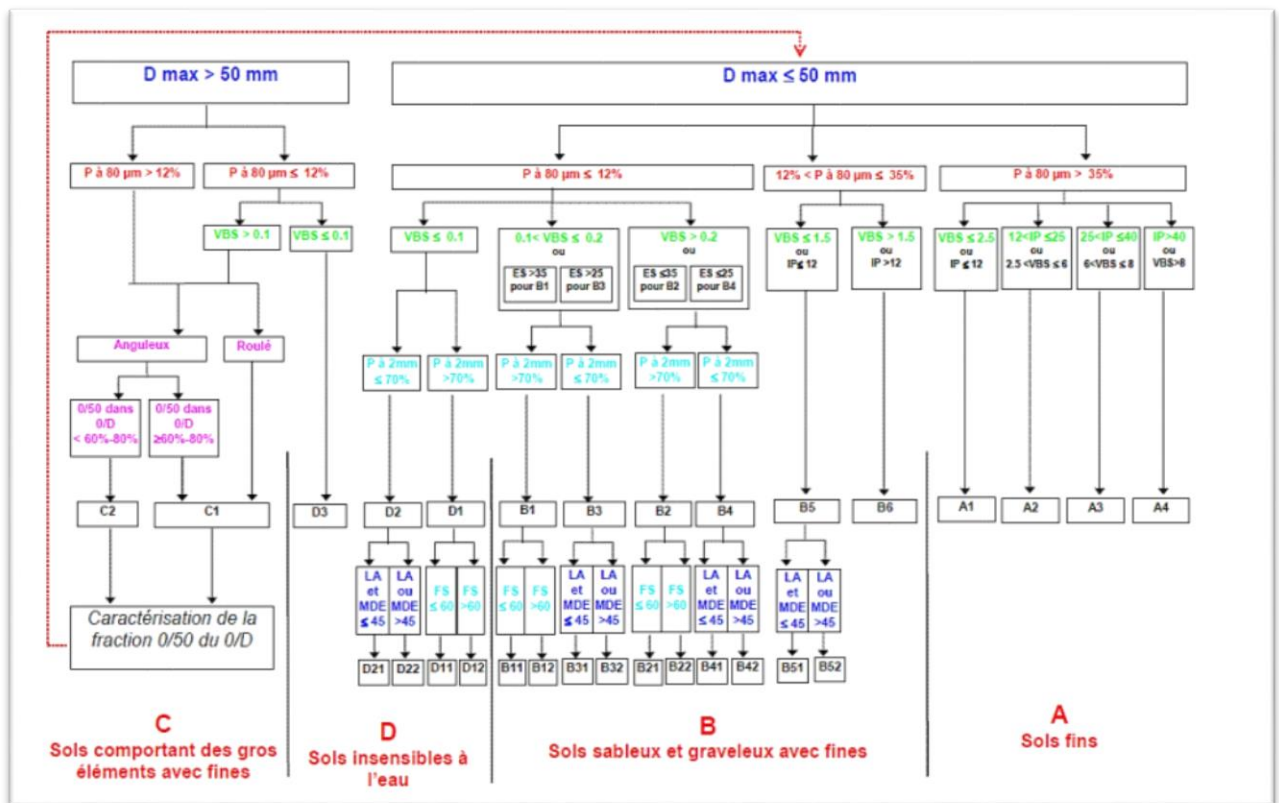


Tableau 2-3 : Temps unitaire moyen pour des terrassements faits manuellement (équipe de 2 manœuvres)

Classe	Nature des matériaux	Temps unitaire (h/m <sup>3</sup> )
A	Argiles, limons, sables argileux (ou encore terre végétale)	1,55 h/m <sup>3</sup>
B	Sables et graves sableuses	2,20 h/m <sup>3</sup>
C	Sol meuble consolidé ou argiles et marnes en mottes (ex.: sol latéritique)	3,10 h/m <sup>3</sup>
D	Sols rocheux défoncés au ripeur, roche altérée	- Sans objet-
E	Matériaux rocheux de carrières	5,00 h/m <sup>3</sup>

### 2-3 Caractérisation des argiles :

Sont fréquemment rencontrés. Les problèmes relatifs à ce type de sol est Qu'ils subissent des déformations importantes sous les charges qui leur sont Appliquées. Leur capacité portante est souvent trop faible pour supporter Les charges prévues. Toutes ces caractéristiques nous amène aux problèmes rencontrés dans la pratique à savoir des tassements excessifs et l'instabilité de l'ouvrage.

### 2-3-1 Etudes des caractéristiques mécaniques des argiles :

#### 2-3-2 Comportement mécanique :

Le comportement mécanique des matériaux est caractérisé par des paramètres qui permettent d'estimer les tassements, la compressibilité ou la consolidation, et la résistance au cisaillement des sols. Ces paramètres sont obtenus à partir des essais géotechniques en

Laboratoire et notamment :

- l'essai de compactage Proctor,
- l'essai de cisaillement direct à la boîte,
- l'essai œdométrique,
- L'essai triaxial.

##### 2-3-2-1 Essai Proctor :

- **objectif :**

Détermination ces caractéristiques sont la teneur en eau optimal et la masse volumique sèche maximale.

- **Appareillage :**

- Moule Proctor.
- Dam Proctor normal.
- Une étuve.
- Une règle
- Une balance.
- Un bac.
- Une éprouvette graduée.
- Tamis 5 mm.

- **Mode opératoire :**



Figure 2- 32: On prend 2 kg d'argile.





**Figure 2-33:** tamiser à tamis 5 mm préalablement préparé qu'on verse dans un bac.



**Figure 2-34:** On ajoute une certaine quantité d'eau proportionnelle on poids d'argile utilisé.



**Figure 2-35:** On remplit le moule Proctor normalisé en trois couche on compacte l'aide de la dame Proctor normal en 25 coup.



**Figure 2-36:** Place de la 2<sup>ème</sup> et 3<sup>ème</sup> couchent.



➤ **Figure 2-37:** Nous l'enlevons en utilisant un appareil.



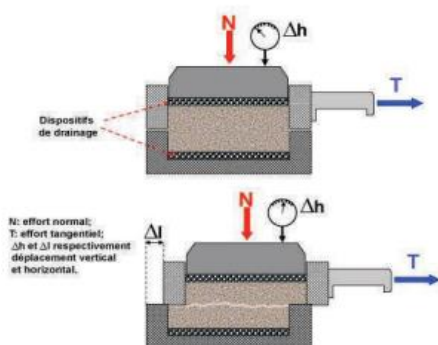
**Figure 2-38:** Déterminer la teneur en eau et le poids volumique  $\gamma_d$ .

### 2-3-2-2 L'essai de cisaillement direct :

- principes de l'essai :

L'essai a pour objet de mesurer les caractéristiques de rupture d'un échantillon de sol fin saturé soumis à un cisaillement direct selon un plan imposé, à une vitesse constante.

En vitesse lente et conditions drainées peuvent être déduites les valeurs de l'angle de frottement effectif  $\varphi'$  et la cohésion effective  $c'$ , paramètres utilisés pour le dimensionnement de fondations, les calculs de vérification des coefficients de sécurité à la rupture de talus et pour la détermination des actions de poussée et de butée sur les ouvrages de soutènement.



**Figure 2-39 :** schéma de la boîte de cisaillement.



L'essai s'effectue sur une éprouvette de sol placée dans un bâti de cisaillement constitué de deux demi-boîtes indépendantes. Le plan de séparation des deux demi-boîtes constitue un plan de glissement préférentiel correspondant au plan de cisaillement de l'éprouvette.

L'essai consiste à (selon la norme NF P94-071-1):

- Consolider l'éprouvette de section  $s$  dans une première phase en appliquant sur la face Supérieure un effort vertical constant maintenu pendant tout l'essai (contrainte  $\sigma_n=N/s$ )

- La phase de consolidation permet de calculer la vitesse à laquelle doit être cisailé

L'échantillon.

- Cisailier ensuite le long du plan de séparation des 2 demi-boîtes en leur imposant un Déplacement relatif à vitesse constante.

- L'effort de cisaillement horizontal ( $T$ ) est mesuré et la contrainte  $t=T/s$  est calculée.

L'essai est réalisé sur au minimum 3 éprouvettes en augmentant à chaque fois la contrainte normale appliquée. [12]



**Figure 2-40:** l appareille cisaillement

### 2-3-2-3 L'essai de compressibilité :

Cet essai de compressibilité à l'odomètre s'applique sur les sols fins et matériaux fin cohérents, avec chargement de paliers.

Il nous permettra d'avoir une représentation du diagramme donnant l'indice des vides ( $e$ ) de l'éprouvette soumise à essai à la fin de chaque palier de consolidation, en fonction de la contrainte effective ( $\sigma'_v$ ), égale à la contrainte totale ( $\sigma_v$ ) qui lui est appliquée en début d'essai

#### – Principe :

L'essai s'effectue sur une éprouvette de matériau placée dans une enceinte cylindrique rigide (odomètre).

Un dispositif applique sur cette éprouvette un effort axial vertical, l'éprouvette étant drainée en haut et en bas est maintenue saturée pendant l'essai.

La charge est appliquée par paliers maintenus constants successivement croissants et décroissants suivant un programme défini.

Les variations de hauteur de l'éprouvette sont mesurées pendant l'essai en fonction de la durée d'application de la charge. [13]



**Figure 2-41:** l'appareille oedomètre

#### **Détermination du coefficient de consolidation $C_v$ :**

On utilise la méthode de Casagrande pour déterminer  $C_v$ . Cette méthode consiste à tracer la courbe  $\Delta h = f(\log t)$

On détermine  $\Delta h_{(U=100\%)}$  le tassement obtenu à la fin de la consolidation primaire par construction graphique.  $\Delta h_{(U=100\%)}$  Correspond à l'ordonnée du point d'intersection entre la tangente à la courbe de tassement au point d'inflexion et la tangente à la partie finale de la

Courbe (voir la figure 2-42). Le temps final de tassement de consolidation primaire  $t_{100}$  correspond à l'abscisse de ce point.

$\Delta h_{(U=50\%)}$  correspondant au tassement à 50 % de la consolidation primaire, est égal à  $\Delta h_{(U=100\%)} / 2$ . Cette valeur de  $\Delta h_{(U=50\%)}$  est obtenue après un temps  $t_{50}$  qu'on lit en abscisse du graphique (figure 8-1). C'est cette valeur de  $t_{50}$  (temps nécessaire pour obtenir 50 % de la hauteur de tassement) que l'on utilise pour calculer  $C_v$ .

Pour une consolidation réalisée à 50 %, la valeur du facteur temps est  $T_v=0,197$ . La valeur de  $C_v$  est alors donnée par:

$$C_v = \frac{T_v \times h^2}{t_{50}} = \frac{0,197 \times h^2}{4 \times t_{50}}$$

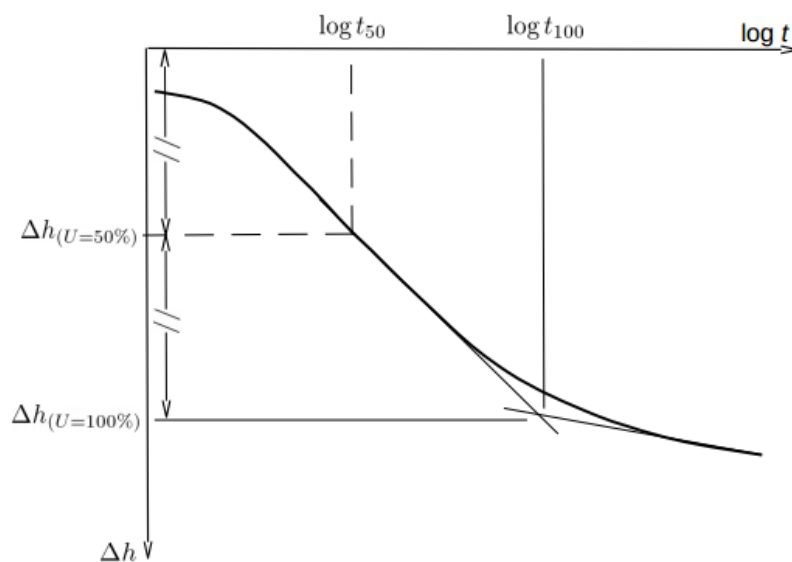
1. Effectuer la construction graphique de Casagrande, en déduire la valeur du coefficient de consolidation et la comparer aux ordres de grandeur donnés ci-après.
2. Comparer les valeurs de  $t_{50}$  et  $t_{100}$  : exprimer le temps nécessaire pour réaliser la deuxième moitié du tassement (de  $\Delta h_{(U=100\%)}$  à  $\Delta h_{(U=50\%)}$ ) en fonction de  $t_{50}$ .

A titre indicatif, voici des ordres de grandeurs de  $C_v$  en fonction du type de sol :

– pour les argiles :  $2 \cdot 10^{-8} < C_v < 4 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ ,

– pour les argiles sableuse :  $C_v$  de l'ordre de  $10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ ,

– pour les limons :  $C_v$  de l'ordre de  $5 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ,



**Figure 2-42** : exploitation de la courbe de consolidation d'après la méthode de Casagrande

### 2-3-2-4 Essai triaxial :

– Définition :

L'essai de compression tri axiale permet de mieux accéder aux propriétés mécaniques des matériaux, car il affecte l'état de contraintes in situ. Cet type d'essai permet de contrôler et de

mesurer la pression interstitielle, d'appliquer une gamme de pression de confinement (isotrope ou anisotrope) pour consolider initialement l'échantillon à un état prédéfini. Les différents types d'essai réalisables sont :

- essai UU (Unconsolidated-undrained) : essai non consolidé non drainé effectué sur matériau saturé ou non
- essai CU (Consolidated-undrained) : essai consolidé non drainé sur matériau saturé ou non
- essai CU+u (Consolidated-undrained) : essai consolidé non drainé sur matériau saturé avec mesure de la pression interstitielle
- essai CD (Consolidated-drained) : essai consolidé drainé sur matériau saturé

### Essai non drainé:

Si le remblai est saturé et sans possibilité de drainage, un changement de l'état des contraintes ne conduit pas à une variation de volume (essai à volume constant) mais induit une modification de la pression interstitielle.

### Essai drainé:

Si le drainage est permis, une augmentation des contraintes conduites à une consolidation et éventuellement à une modification de la pression interstitielle. Dans ce cas, la variation de la pression interstitielle est négligeable par rapport à l'accroissement de la contrainte appliquée. Le type d'essai réalisé dans ce projet est l'essai consolidé drainé.

### Consolidation:

La consolidation d'un matériau résulte en général de la variation des contraintes (effectives) qui lui sont appliquées et se traduit par une variation de volume. La consolidation est isotrope si  $\Delta s_1 = \Delta s_3$  et anisotrope si  $\Delta s_1 \neq \Delta s_3$ . Cette consolidation a pour effet de rétablir et de simuler l'état des contraintes in situ avant d'appliquer la charge axiale. Il semble de toute évidence que la consolidation anisotrope donne de meilleurs résultats de la résistance et des données contrainte-déformation.

La cohésion C:

C'est la résistance au cisaillement d'un sol sous une contrainte normale nulle,

$$C = S + P \tan \Phi.$$

### Cisaillement :

Les sols se comportent lorsque la valeur de la contrainte de cisaillement  $\tau$  dépasse une certaine valeur en fonction de la contrainte normale. La rupture se déclare par une

déformation continue au même temps croit avec les contraintes. La courbe intrinsèque étudiée la résistance au cisaillement.

Après la consolidation, l'échantillon est ensuite cisailé à une vitesse de chargement constante. Le cisaillement d'une éprouvette de remblai consiste à lui imposer une variation du déviateur ( $\sigma_1 - \sigma_3$ ) jusqu'à la rupture suivant un plan quelconque.

### – **Description de l'essai :**

(Vutukuri et.al, 1974 ; Paterson, 1978).

L'essai de compression triaxiale consiste à soumettre une éprouvette cylindrique à un champ de contrainte uniforme qui une pression hydraulique  $\sigma_3$  appliquée par l'intermédiaire d'un fluide remplissant, la cellule et une contrainte axiale ou déviateur

( $\sigma_1 - \sigma_3$ ) appliquée par l'intermédiaire d'un piston. Dans un essai, l'éprouvette est soumise à un champ de contraintes isotropes jusqu'à une valeur donnée. On maintient ensuite à niveau constant la pression hydraulique représentée par  $\sigma_1$  et  $\sigma_3$ , on augmente progressivement la contrainte axiale  $\sigma_1$  ou le déviateur ( $\sigma_1 - \sigma_3$ ) jusqu'à la rupture de l'éprouvette. Les essais peuvent être effectués à différentes pressions de confinement. Dans l'essai de compression triaxiale avec cycles de chargement-déchargement-rechargement, l'éprouvette est soumise à des sollicitations. A différents niveaux de la contrainte axiale dévia torique (1, 2 et 3), on a la déchargée jusqu'à l'état hydrostatique, puis on rechargement jusqu'à un niveau de contrainte axiale supérieur au précédent niveau de contrainte axiale de déchargement et de nouveau, on décharge et ainsi de suite, jusqu'à la rupture.

### – **But de l'essai:**

La détermination de la courbe intrinsèque du sol étudié a fin de calculer la résistance au cisaillement  $t$  sous une contrainte normale  $s$  et de déduire les caractéristiques mécaniques (angle de frottement interne) et  $C$  (cohésion).

### – **Principe de l'essai :**

L'essai de compression triaxiale est effectué à l'aide d'une cellule triaxiale en acier inoxydable. Le dispositif doit permettre la mesure de la quantité de fluide drainé afin de contrôler la variation volumétrique, et peut également être équipé d'un capteur de pression pour mesurer la pression interstitielle. L'éprouvette est recouverte d'une membrane imperméable avant d'être montée dans la cellule triaxiale. Une fois l'éprouvette montée, la cellule est remplie du liquide de confinement (de l'eau ou de l'huile hydraulique). Ce dispositif est ensuite placé entre les deux plateaux de la presse et branché à l'air afin de consolider

l'échantillon à la pression de confinement souhaitée. Lorsque la variation volumétrique de l'échantillon est stable, l'échantillon a été consolidé et on applique une charge déviatorique au piston de la cellule triaxiale pour cisailier l'éprouvette jusqu'à la rupture.

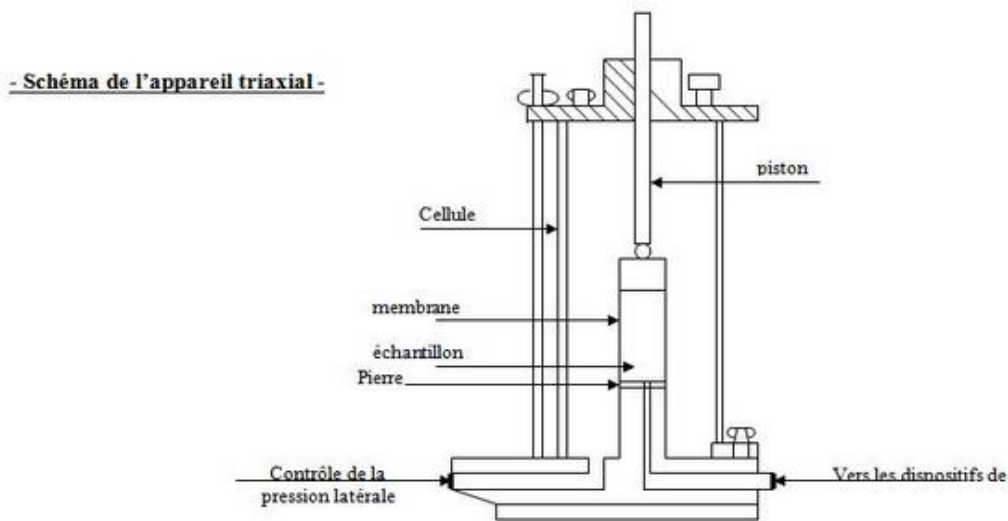


Figure 2-43: l'appareil triaxial

La détermination des paramètres caractérisant l'état de rupture d'un remblai nécessite la réalisation de plusieurs essais sur différentes éprouvettes de remblai. Les éprouvettes sont homogènes. La résistance au cisaillement  $\tau_f$  d'une éprouvette est déterminée à la rupture de l'éprouvette et elle correspond soit à la contrainte de cisaillement à la rupture dans le cas des déformations homogènes par plastification soit à la contrainte tangentielle sur le plan de rupture lors d'une localisation des déformations à la rupture. Cette résistance au cisaillement est définie par le critère de Mohr-Coulomb qui est:

$$\tau_f = c + \sigma_n \tan \varphi$$

Avec  $c$  la cohésion,  $\sigma_n$  la contrainte normale et  $\varphi$  l'angle de frottement interne. Excepté le cas où l'angle de frottement est nul, le déviateur à la rupture est tel que  $(\sigma_1 - \sigma_3)_f > 2 \tau_f$ . Le

-Contraintes sur un plan quelconque au sein d'une éprouvette -

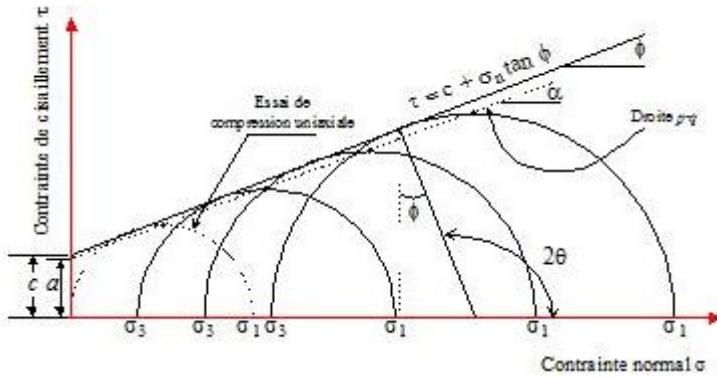


Figure 2-44 : cercle de Mohr

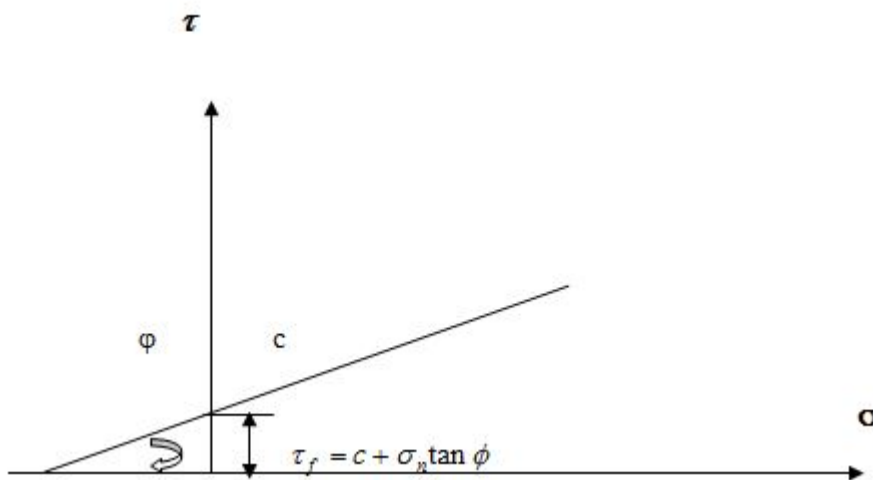


Figure 2-45: Représentation du critère de Mohr–coulomb.

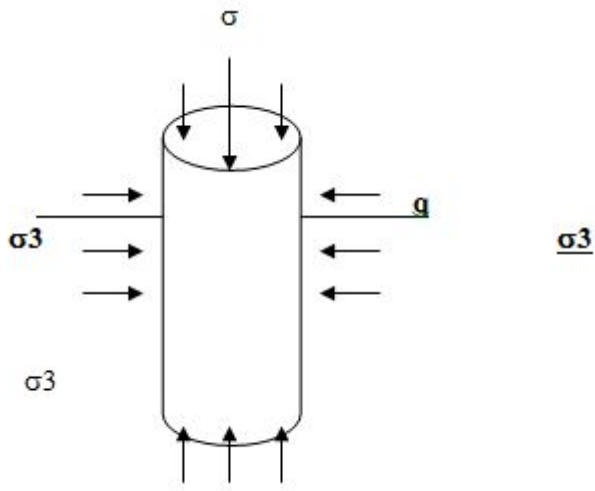
Soit une éprouvette du sol de forme cylindrique soumise à un champ de contraintes  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ , la contrainte normale  $s$  agissant sur une facette quelconque située dans l'échantillon se décompose en une contrainte effective  $s'$  supportée par le squelette solide et une pression interstitielle ( $\sigma = \sigma' + u$ ). Les contraintes appliquées à un échantillon dans cet essai représentent les contraintes principales.

$C$  : à la dimension d'une contrainte et s'appelle la cohésion.

$\varphi$  : L'angle de frottement interne.

$\tau$  : La résistance au cisaillement du sol considéré.

$\sigma$  : La contrainte normale appliquée à la facette de glissement.



On a:  $\sigma_1 = \sigma_3 + q$

À partir la courbe intrinsèque, on peut déterminer directement les caractéristiques mécaniques du sol (c et  $\phi$ ).



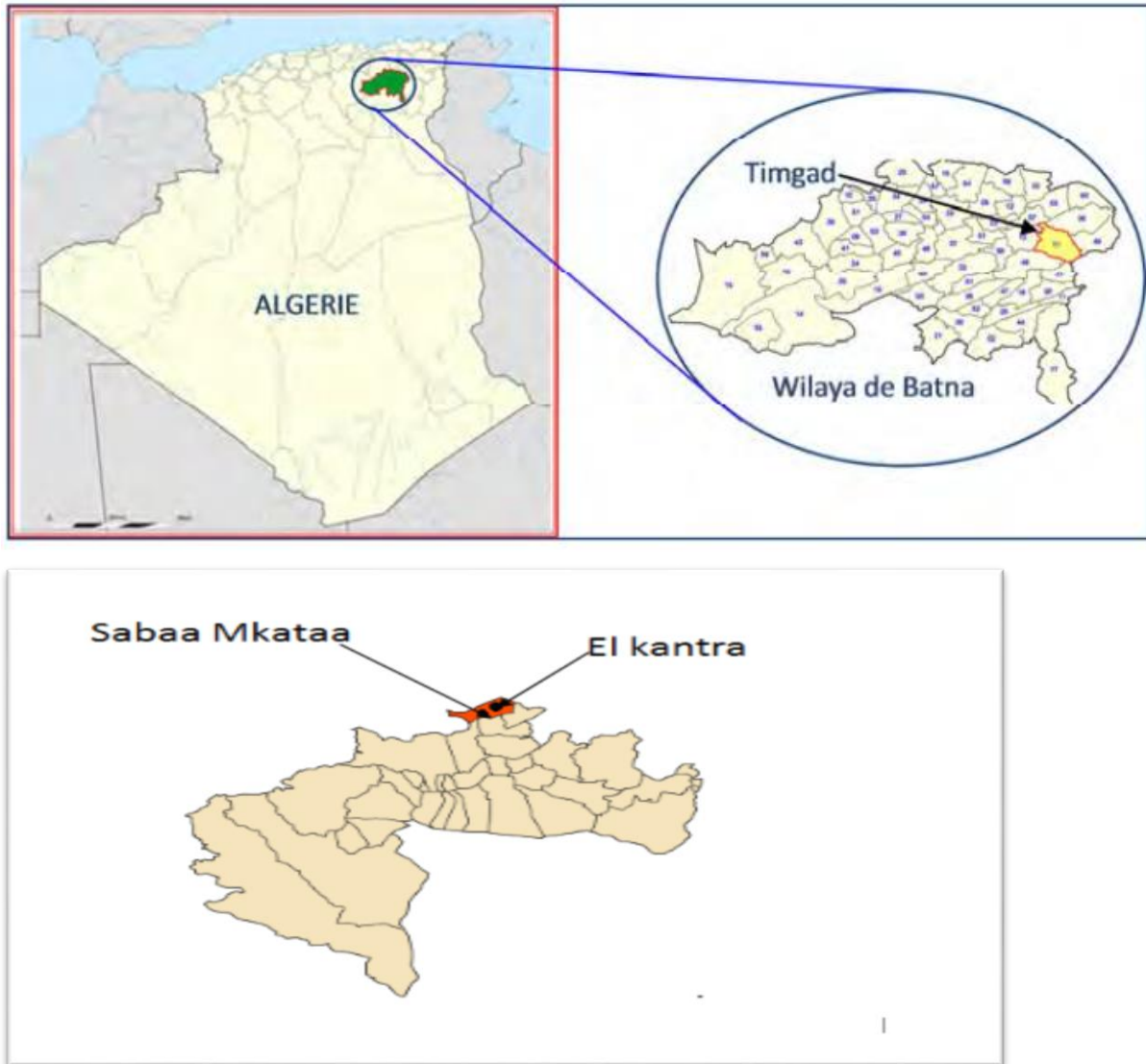
Figure 2-46: l'appareil triaxial



# CHAPITRE 03 :

## Résultats expérimentaux et discussion

- ARGILES ETUDIÉES ET TRAITEMENT THERMIQUE :



**Figure 3-1:** présentation de site de prélèvement wilaya de Biskra et Batna.



**Figure 3-2:**Argile El-kantra

– **Argile El-kantra :**

C'est une argile ocre verdâtre et brune, située à 50 km au nord de la wilaya de Biskra, et elle est utilisée dans la poterie.



**Figure 3-3:** argile de Sabaa Mkataa

– **Argile de Sabaa Mkataa:**

C'est une argile verte situé dans la région de Sabaa Mkataa, à 35 km au nord de la wilaya de Biskra, elle n'est pas encore exploitée.



**Figure 3-3:** Argile de Timgad

– **Argile de Timgad :**

C'est une argile brunâtre, située à 150 km au nord de la wilaya de Biskra, et elle est exploitée par la briqueterie.

**3-1 Expression et résultats des essais :**

- **Limite de liquidité avec la limite d'atterberg :**

La limite de liquidité WL est la teneur en eau du matériau qui correspond à une fermeture sur 1cm des lèvres de la rainure après 25 chocs.

- **Limite de liquidité avec le cône de pénétration :**

La limite liquidité WL est la teneur en eau qui correspond à un enfoncement de 17 mm.

- **Limite de plasticité:**

La limite de plasticité WL est la teneur en eau d'un rouleau de sol qui se fissure au moment où son diamètre atteint 3mm.

- **Indice de plasticité:**

**IP** est la différence entre les valeurs des limites de liquidité et de plasticité.

### 3-2 Présentation de résultats :

**Tableau3-1** : limite de liquidité de l'argile El-kantra

Essai	1	2	3
Nombre de coup	15	27	30
Masse de la tare: $m_1(g)$	98.52	97.17	91.88
	100.64	104.18	94.91
Masse totale humide (tare+sol humide) : $m_2$	107.61	105.18	99.76
	110.04	110.47	104.07
Masse totale sèche (tare+sol sec): $m_3$	104.85	102.84	97.5
	107.2	108.66	101.42
Masse d'eau évaporée: $m_w=m_2-m_3(g)$	2.8	2.075	2.455
Masse de sol sec: $m_d=m_3-m_1(g)$	6.445	5.075	5.065
<b>Teneur en eau en w%</b>	43.444	40.886	40.478
<b>Limite de liquidité <math>w_L\%</math></b>	41.25		

**Tableau3-2** : limite de liquidité de l'argile de Sabaa Mkataa

Essai	1	2	3
Nombre de coup	19	25	31
Masse de la tare: $m_1(g)$	106.30	91.95	97.24
	98.59	104.12	98.53
Masse totale humide (tare+sol humide) : $m_2$	111.34	98.55	102.53
	104.12	111.39	106.09
Masse totale sèche (tare+sol sec): $m_3$	109.27	95.90	100.46
	101.80	108.38	103.20
Masse d'eau évaporée: $m_w=m_2-m_3(g)$	2.195	2.83	2.48
Masse de sol sec: $m_d=m_3-m_1(g)$	3.09	4.105	3.945
<b>Teneur en eau en w%</b>	71.035	68.94	62.86
<b>Limite de liquidité <math>w_L\%</math></b>	68.94		

**Tableau 3-3 : limite de liquidité de l'argile de Timgad**

Essai	1	2	3
Nombre de coup	15	25	31
Masse de la tare: $m_1(g)$	102.5	96.58	100.03
	104.27	62.9	108.45
Masse totale humide (tare+sol humide) : $m_2$	110.88	103.56	108.52
	109.52	69.04	113.38
Masse totale sèche (tare+sol sec): $m_3$	108.4	101.69	106.28
	107.97	67.39	112.08
Masse d'eau évaporée: $m_w=m_2-m_3(g)$	2.015	1.77	1.76
Masse de sol sec: $m_d=m_3-m_1(g)$	4.8	4.94	4.8
Teneur en eau en w%	41.979	36.666	35.829
<b>Limite de liquidité <math>w_L\%</math></b>	36.66		

### 3-2-1 Limite de plasticité WP :

**Tableau 3-4 : limite de plasticité de l'argile El-kantra**

Essai	1	2	3
Masse de la tare: $m_1(g)$	104.2	92.52	92.32
Masse totale humide (tare+sol humide) : $m_2 (g)$	105.3	93.45	93.65
Masse totale sèche (tare+sol sec): $m_3 (g)$	105.09	93.45	93.41
Masse d'eau évaporé: $m_w=m_2-m_3(g)$	0.21	0.18	0.24
Masse de sol sec : $m_d=m_3-m_1(g)$	1.07	0.93	1.09
Teneur en eau en W%	19.626	19.354	22.018
<b>Limite de plasticité <math>W_p\%</math> : <math>W_p=(W_1+W_2W_3)/3</math></b>	20.33		

**Tableau 3-5 : limite de plasticité de l'argile Sabaa Mkataa**

Essai	1	2	3
Masse de la tare: $m_1(g)$	111.72	95.04	92.45
Masse totale humide (tare+sol humide) : $m_2 (g)$	112.92	96.61	94.05
Masse totale sèche (tare+sol sec): $m_3 (g)$	112.58	96.05	93.56
Masse d'eau évaporé: $m_w=m_2-m_3(g)$	0.34	0.56	0.51
Masse de sol sec : $m_d=m_3-m_1(g)$	1.332	1.9	1.60
Teneur en eau en W%	25.53	29.44	31.87
<b>Limite de plasticité <math>W_p\%</math> : <math>W_p=(W_1+W_2W_3)/3</math></b>	28.94		

**Tableau 3-6** : limite de plasticité de l'argile de Timgad

Essai	1	2	3
Masse de la tare: $m_1$ (g)	106.5	97.37	61.5
Masse totale humide (tare+sol humide) : $m_2$ (g)	107.77	98.78	62.91
Masse totale sèche (tare+sol sec): $m_3$ (g)	107.54	98.47	62.64
Masse d'eau évaporé: $m_w=m_2-m_3$ (g)	0.23	0.31	0.27
Masse de sol sec : $m_d=m_3-m_1$ (g)	1.04	1.1	1.14
Teneur en eau en W%	22.115	28.181	23.684
Limite de plasticité WP% : $WP=(W_1+W_2+W_3)/3$	24.660		

**Tableau 3-7** : l'indice de consistance et de plasticité

	Argile d'El-Kantra	Argile de Sabaa Mkataa	Argile de Timgad
Limite de liquidité $w_L$ (%)	41.25	68.94	36.66
Limite de plasticité $w_p$ (%)	20.33	28.94	24.66
Indice de plasticité $I_p=w_L-w_p$	20.91	40	12
Teneur en eau du sol $w$ (%)	20.94	55.44	45.94
Indice de consistance $I_c$	0.97	0.48	0.13

- Degré de plasticité l'argile de Timgad est Moyennement plastique, et l'argile d'El-kantra est Plastique, et l'argile de Sabaa Mkataa est Très plastique.

**Tableau 3-8:** Analyse granulométrique de l'argile de Sabaa Mkataa

Ouvertures des tamis (mm)	Masse de refus cumulés R (g)	Pourcentages des refus cumulés R(%)	Pourcentages des tamisas cumulés T(%)
20	0	0	100
10	0	0	100
5	0.1	0.11	99.88
2	0.65	0.72	99.27
1	1.72	1.91	98.08
0.4	12.49	13.87	86.12
0.2	65.74	73.04	26.95
0.1	79.8	88.66	11.33
0.08	80.8	89.77	10.22

**Tableau 3-9:** Analyse granulométrique de l'argile d'El-kantra

Ouvertures des tamis (mm)	Masse de refus cumulés R (g)	Pourcentages des refus cumulés R(%)	Pourcentages des tamisas cumulés T(%)
20	0	0	100
10	10.55	5.62	94.37
5	21.84	11.64	88.36
2	36.66	19.54	80.46
1	45.71	24.37	75.63
0.4	71.8	38.27	61.73
0.2	135.58	72.27	27.29
0.1	174.67	93.11	6.89
0.08	186.55	99.44	0.55



**Tableau 3-10:** Analyse granulométrique de l'argile de Batna (Timgad)

Ouvertures des tamis (mm)	Masse de refus cumulés R (g)	Pourcentages des refus cumulés R(%)	Pourcentages des tamisas cumulés T(%)
20	0	0	100
10	5.68	6.45	93.54
5	9.4	10.68	89.32
2	14.56	16.54	83.45
1	19.28	21.90	78.09
0.4	26.54	30.16	69.84
0.2	43.23	49.13	50.87
0.1	71.78	81.57	18.43
0.08	83.57	94.97	5.034

### 3-2-2 Par sédimentométrie :

- A partir des lecteurs R on détermine les lecteurs corrigés  $R_1$  en tenant compte :
- De la température ( $C_t$ )
  - Du ménisque ( $C_m$ )
  - Du défoculant ( $C_d$ )

$$R_1 = R + C \text{ avec } C = C_m + C_d + C_t$$

On calcul en suite le pourcentage p des grains pour les différents diamètres équivalents à partir de la formule :

$$P(\%) = \frac{v}{m} \times \frac{\rho_s}{\rho_s - 1} \times \frac{R_1}{10}$$

V= volume de la suspension (2000 cm<sup>3</sup> ou 1000 cm<sup>3</sup> pour l'éprouvette 1 l).

m = masse de l'échantillon du sol (80 g ou 40 g pour l'éprouvette de 1l).

$\rho_s$  = masse spécifique des grains de sol (2.65g/cm<sup>3</sup>).

$R_1$  = lecteur corrigée.

**Tableau 3-11:** analyse granulométrique par sédimentométrie d'Argile El-kantra

Temps de lecture	R densimètre	Température C°	D ( $\mu m$ )	P (%)
30 sec	11	18,7	75	81,34
1 min	10	18,2	55	81,34
2 min	11	18,4	38	73,75
5 min	10	18,4	25	66,16
10 min	9	18,5	17	58,64
20 min	8	18,6	12	54,90
40 min	7	18,7	8	54,95
80 min	7	18,8	5	43,63
240	6	18,8	2	28,13
1440	4	18,3	1	20,34



**Figure 3-4 :** courbe analyse granulométrique de argile El-kantra.

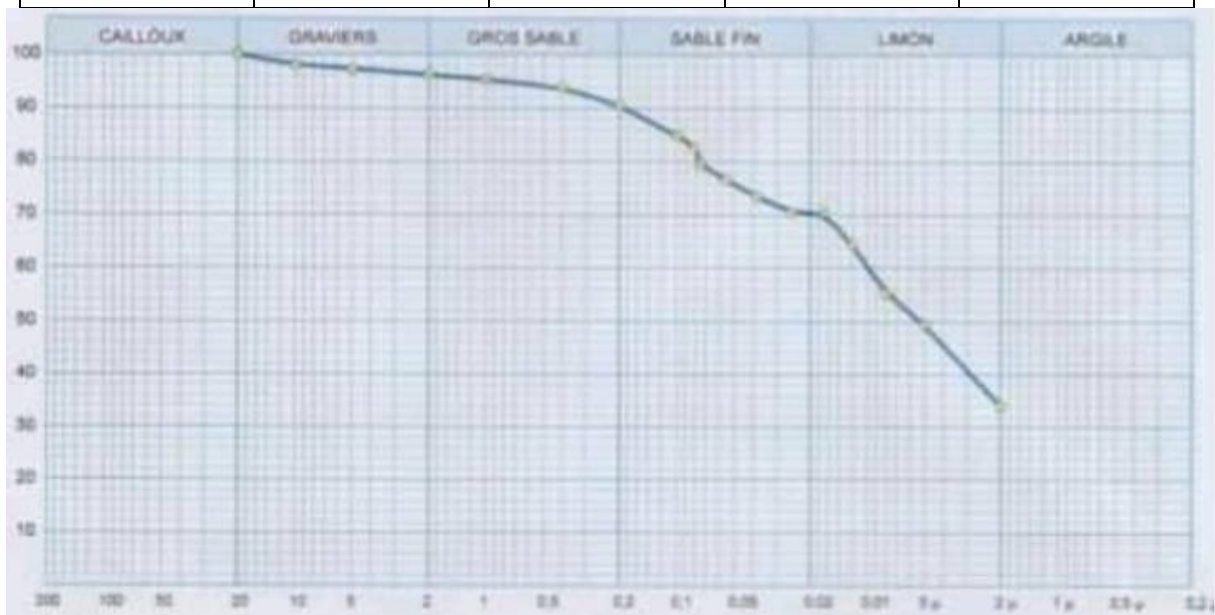
**Tableau 3-12:** analyse granulométrique par sédimentométrie Argile Sabaa mkataa

Temps de lecture	R densimètre	Température C°	D ( $\mu m$ )	P (%)
30 sec	11	18,7	75	83,84
1 min	10	18,2	55	81,33
2 min	11	18,4	38	78,82
5 min	10	18,4	25	76,33
10 min	9	18,5	17	71,32
20 min	8	18,6	12	76,33
40 min	7	18,7	8	66,34
80 min	7	18,8	5	58,92
240	6	18,8	2	43,45
1440	4	18,3	1	38,20

**Figure 3-5 :** courbe analyse granulométrique de argile sabaa mkataa.

**Tableau 3-13** : analyse granulométrique par sédimentométrie Argile Timgad

Temps de lecture	R de lecteur densimètre	Température C°	D ( $\mu\text{m}$ )	P (%)
30 sec	11	18,7	75	79,53
1 min	10	18,2	55	76,52
2 min	11	18,4	38	73,50
5 min	10	18,4	25	70,49
10 min	9	18,5	17	70,46
20 min	8	18,6	12	64,40
40 min	7	18,7	8	55,33
80 min	7	18,8	5	49,45
240	6	18,8	2	34
1440	4	18,3	1	30,12

**Figure 3-6** : analyse granulométrique d'argile Timgad

### 3-3 Essai au bleu de méthylène :

- Valeur de bleu pour la fraction concernée:

$$V_B = \frac{Vl}{md}$$

- L'activité de bleu de la fraction argileuse

L'activité argileuse ACB est le rapport entre la valeur de bleu de méthylène VBS déterminée selon la norme NF P 94-068 et la teneur C2 en particules de dimensions inférieures à  $2\mu\text{m}$  estimée selon la norme NF P 94-057

$$A_{CB} = \frac{VBS}{C2}$$

**Tableau 3-14** : valeur de bleu méthylène

	Argile El-kantra	Argile Sabaa Mkataa	Argile Timgad
Valeur de bleu $V_{BS}$	4,56	8,33	3,3
L'activité de bleu $A_{CB}$	16,21	19,17	9,71

- Valeur de bleu d'argile de Sabaa Mkataa est seuil entre les sols argileux et très argileux  $VBS > 8$ , et argile El-kantra et Timgad seuil entre les sols limoneux et argileux ( $2.5 < VBS < 6$ )

### 3-4 Essai Proctor :

- La masse volumique sèche :
- $\gamma_d = \frac{\gamma_h}{1+w}$
- $\gamma_h$  : la masse volumique humide ( $\gamma_h = \frac{m}{v}$ ).
- $w$  : la teneur en eau.

**Tableau 3-15:** résultat d'essai Proctor l'argile d'El-kantra

Quantité d'eau	80 ml		160 ml		320 ml		400 ml	
N°échantillon	1	2	1	2	1	2	1	2
Masse de la tare: <b>m<sub>1</sub>(g)</b>	109.75	98	98.47	61.47	102.23	100.85	98,47	94,43
Masse totale humide (tare+sol humide) : <b>m<sub>2</sub> (g)</b>	131	134	115.43	90.42	125.49	137.45	113,35	138,14
Masse totale sèche (tare+sol sec): <b>m<sub>3</sub> (g)</b>	120.99	130.42	111.39	85.05	122.35	131.2	111,26	134,94
Masse d'eau évaporé: <b>m<sub>w</sub>=m<sub>2</sub>-m<sub>3</sub>(g)</b>	5.57		4.87		4.65		2.62	
Masse de sol sec : <b>m<sub>d</sub>=m<sub>3</sub>-m<sub>2</sub>(g)</b>	23.38		22.08		25.24		20.13	
La teneur en eau W%	23.82		22.086		18.44		13.048	
Masse volumique humide $\gamma_h$	1.84		2.032		1.96		1.87	
Masse volumique sèche $\gamma_d$	1.49		2.25		2.15		2.003	
<b>La teneur en eau optimal W<sub>Optimal</sub></b>	22.5							

**Tableau 3-16** : résultat d'essai Proctor l'argile de sabaa mkataa

Quantité d'eau	80 ml		160 ml		320 ml		400 ml		420	
N°échantillon	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
Masse de la tare: $m_1(g)$	98.48	94.89	102.41	104.03	61.28	102.62	93.29	102.46	61.44	97.5
Masse totale humide (tare+sol humide) : $m_2(g)$	110.8	120.41	133.6	118.55	81.44	133.33	108.16	131.25	76.56	112.03
Masse totale sèche (tare+sol sec): $m_3(g)$	107.86	114.03	127.52	115.96	78.24	129.03	107.66	129.73	75.52	110.7
Masse d'eau évaporé: $m_w=m_2-m_3(g)$	4.66		4.335		3.75		1.01		1.185	
Masse de sol sec : $m_d=m_3-m_2(g)$	14.16		18.52		21.68		20.82		27.28	
La teneur en eau W%	32.67		23.41		17.29		4.85		4.34	
Masse volumique humide $\gamma_h$	1.45		1.54		1.71		1.81		1.76	
Masse volumique sèche $\gamma_d$	1.77		1.78		1.88		1.86		1.81	
<b>La teneur en eau optimal <math>W_{Optimal}</math></b>	15.5									

**Tableau 3-17** : résultat d'essai Proctor l'argile de Timgad

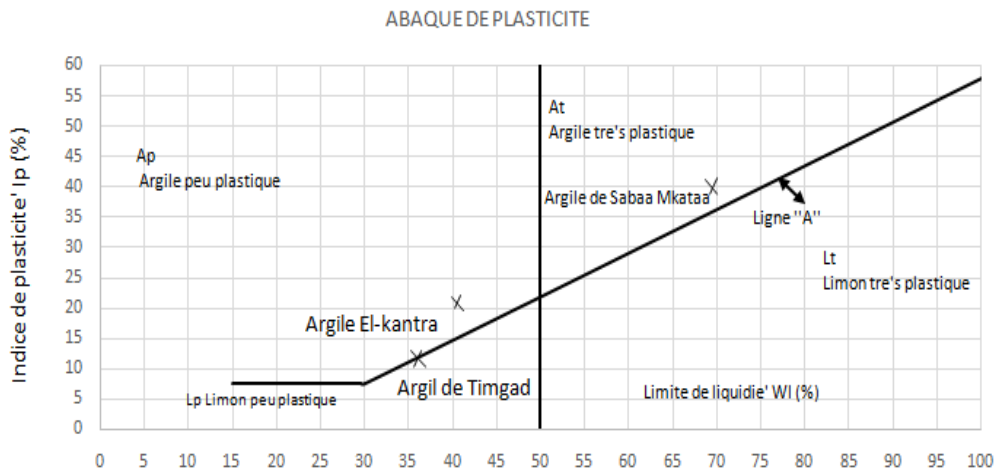
Quantité d'eau	80 ml		160 ml		320 ml		400 ml	
N°échantillon	1	2	1	2	1	2	1	2
Masse de la tare: <b>m<sub>1</sub>(g)</b>	107.95	101.3	98.58	98.59	101.46	96.81	101,32	96,77
Masse totale humide (tare+sol humide) : <b>m<sub>2</sub> (g)</b>	136.34	129.25	141.32	136.18	150.3	142.63	138,66	130,1
Masse totale sèche (tare+sol sec): <b>m<sub>3</sub> (g)</b>	133.97	126.4	136.1	131.74	141.86	135.1	131,12	128,23
Masse d'eau évaporé: <b>m<sub>w</sub>=m<sub>2</sub>-m<sub>3</sub>(g)</b>	2.61		4.83		7.98		4.705	
Masse de sol sec : <b>m<sub>d</sub>=m<sub>3</sub>-m<sub>2</sub>(g)</b>	25.56		35.33		39.34		30.63	
La teneur en eau W%	10.21		13.67		20.29		15.36	
Masse volumique humide $\gamma_h$	1.79		1.80		2		1.91	
Masse volumique sèche $\gamma_d$	1.90		1.94		2.21		2.06	
<b>La teneur en eau optimal W<sub>Optimal</sub></b>	22							

- la quantité d'argile et la teneur en calcite contribuent à élève ou à abaisser les valeurs de cette densité, pour l'argile de Sabaa mkataa est élève, et les argiles de El-kantra et Timgad est moyenne.



### 3-5 Classification des argiles :

#### 3-5-1 Limite d'atterberg :



**Figure 3-7 :** classification des sols fins, diagramme de plasticité LCPC 1965

- La projection des résultats obtenus à partir de l'expérience terminée sur le graphique présenté dans l'image ci-dessus, nous concluons que :
  - o Argile d'El-kantra peu plastique.
  - o Argile Timgad peu plastique.
  - o Argile de sabaa mkataa très plastique.

**Tableau 3-18:** l'absorption d'eau

Absorption d'eau	WL
Faible	20 à 10
moyenne	25 à 50
élevée	50 à 70
Très élevée	Au-delà de 70

- L'absorption de l'eau par des argiles de Timgad et El-kantra est moyenne celle de l'argile de Sabaa Mkataa est élevée.
- Le gonflement des argiles s'accroît avec l'augmentation de l'eau absorbée, Dakshnamurthy et Raman (1973) donnent une relation entre la limite de liquidité et le gonflement des argiles.

**Tableau 3-19** : classification proposée par Dakshanamurthy et Raman(1973).

Limite de liquidité $W_L$	Classification
0-20	Non gonflent
20-35	Gonflent faible
35-50	Gonflent moyen
50-70	Gonflent élevé
70-90	Gonflent très élevé
> 90	Gonflent critique

- En se référant au limite d'atterberg, le gonflement de l'argile de Sabaa Mkataa est élevé, tant dis que le gonflement des argiles de Timgad et El-kantra est moyen.

### **3-5-2 La plasticité :**

Les éléments inférieurs à 400  $\mu\text{m}$  contenus dans un sol sont caractérisés au moyen des limites d'Atterberg et de l'indice de plasticité (Tableau 3-21) :

**Tableau 3-20** : Qualificatif de la fraction du sol constituée d'éléments inférieurs à 400  $\mu\text{m}$  en fonction de l'indice de plasticité afnor P 94-011

Indice de plasticité	Qualificatif
$I_p \leq 12$	non plastique
$12 < I_p \leq 25$	peu plastique
$25 < I_p \leq 40$	plastique
$I_p > 40$	très plastique

- L'indice de plasticité pour les argiles de Timgad et El-kantra est peu plastique, et argile de Sabaa Mkataa très plastique.

Ainsi, la classification de Ranganatham et Satyanarayana (1955) donnée par le tableau (3.2)

**Tableau 3-21:** Potentiel de gonflement d'après Ranganatham Et Satyanarayana (1965).

$I_p$	Potentiel de gonflement
>35	Très élevé
20- 35	Elevé
10- 20	Moyen
<10	Faible

- A partir des résultats de la tendance réalisée, nous puissions dans les données du tableau ci-dessus la potentiel de gonflement de l'argile de El-kantra est élevé, et Timgad est moyenne et pour la possibilité de gonflement de sabaa mkataa sont très élevé.

**Valeur au bleu de méthylène :**

Les résultats de cet essai montrent que, la petite quantité de bleu de méthylène absorbé par les argiles de Timgad et El-kantra, et grande quantité par l'argile de Sabaa Mkataa.

D'après Bigot et Zerhouni, (2000) on peut savoir la susceptibilité de variation de volume en fonction de la valeur au bleu adsorbé (tableau 3-22).

**Tableau 3-22 :** la susceptibilité de variation de volume en fonction de  $V_{BS}$  Bigot et Zerhouni, 2000.

$V_{BS}$	Susceptibilité de variation de volume du sol
> 6	Fort
$2 < V_{BS} < 6$	Moyen
< 2	Faible

- Résultats de l'expérience sur le bleu de méthylène et des données du tableau ci-dessus, nous concluons que :
  - o L'argile d'El-kantra est moyenne.
  - o L'argile d'El-kantra est moyenne.
  - o L'argile sabaa mkataa est fort.

**Tableau 3-23:** Qualificatif de la fraction argileuse d'après la norme afnor p 94-011

Activité de la fraction argileuse du sol	Qualificatif
$0 \leq A_{CB} \leq 3$	inactive
$3 < A_{CB} \leq 5$	Peu active
$5 < A_{CB} \leq 13$	moyenne
$13 < A_{CB} \leq 18$	active
$18 < A_{CB}$	très active

- D'après les expériences qui ont été faites et d'après le tableau ci-dessus, nous concluons que :
  - L'argile d'El-kantra est active.
  - L'argile de sabaa mkataa est active.
  - La argile de Timgad est moyenne.

### **3-5-3 La consistance :**

Indice de consistance  $I_c$  situe la teneur en eau  $w$  (en général, la teneur en eau naturelle  $W_{nat}$ ) mesurée sur la même fraction granulométrique que les limites d'Atterberg, par rapport aux limites d'Atterberg.

**Tableau3-24 :** Qualificatif du sol en fonction de l'indice de consistance afnor P 94-011

$I_c$	< 0	0	0,25	0,5	0,75	1	> 1
Consistance	Liquide	Très molle	Molle	Ferme	Très ferme	Dure	

- L'argile d'El-kantra est très ferme,
- L'argile de Sabaa Mkataa est molle,
- L'argile de Timgad est très molle.

Conclusion  
général et  
Références  
bibliographiques

### **Conclusion général:**

Le travail présenté dans le cadre de ce mémoire décrit les potentialités d'utilisation des gisements d'argile de la wilaya de Biskra et Batna. Nous classons pour savoir si le type d'argile étudié gonflant plastique .....

Les sols argileux sont très varié et complexe, et les minéraux les plus répandu sont (kaolinite, l'illite, smectites).

Les sols argileux sont très sensible à l'eau, et cela du à la faible perméabilité et une grande surface spécifique.

Ce travail vise à identifier des argiles, et connaitre les propriétés des argiles.

Et à partir des expériences que nous avons faites et des résultats obtenus, nous classons l'argile.

Les résultats expérimentaux nous ont conduits aux conclusions suivantes :

-La plasticité élevée des argiles se traduit par une quantité d'eau absorbée importante.

-Le gonflement des argiles s'accroît avec l'augmentation de la plasticité, c'est-à-dire

L'augment de la quantité d'eau absorbé.

-L'argile de Sabaa Mkataa, a un potentiel de gonflement élevé, et les argiles El-kantra et Timgad, à un potentiel de gonflement moyen.

-La susceptibilité de variation de volume, fort pour l'argile de Sabaa Mkataa, et moyen pour les argiles de Timgad et El-kantra.

-Activité de la fraction argileuse du sol, est active pour les argiles de Timgad et El-kantra, et moyenne pour l'argile de Timgad.

- Les éléments inférieurs à 400  $\mu\text{m}$  contenus dans un sol sont caractérisés au moyen des limites d'Atterberg et de l'indice de plasticité, les argiles Timgad et El- Kantra peu plastique, et argile de Sabaa Mkataa très plastique.

## Références bibliographiques :

- [1] <https://geotechnicien186.blog4ever.com/ch3-les-argiles>
- [2] G. MILLOT. Géologie des argiles, Tomel, Masson 1954.
- [3] G. M. HERNANDEZ, Thèse de doctorat : Etude Expérimentale de la sorption d'eau et du gonflement des argiles par Microscopie à Balayage Environnementale (ESEM) et l'analyse digital d'image. P 17(2002).
- [4] Hossein Nowamooz. Retrait/gonflement des sols argileux compactés et naturels. Sciences de l'ingénieur[*physics*]. Institut National polytechnique de lorraine – INPL, 2007. Française. NNT: 2007INPL107N. tel-01752833v2
- [5] <https://geotechnicien186.blog4ever.com/ch5-les-argiles>
- [6] Norme, N. F. P94-051 (1993) Reconnaissance et essai de détermination des limites d'atterberg.
- [7] NF, P. 94-052-1, 1995. Détermination des limites d'Atterberg, méthode du cône de pénétration.
- [8] AFNOR. XP P 94-041. Sols : reconnaissance et essais –Identification granulométrique Méthode de tamisage par voie humide. AFNOR, (1995).
- [9] NF, P. (1992). 94-057. Sols: Reconnaissances et essais, analyse granulométrique des sols, méthode par sédimentation. Book titre, Association Française de Normalisation, France (in French).
- [10] NF, P. "94-068, Sols: Reconnaissance et essais, Mesure de la capacité d'adsorption de bleu de méthylène d'un sol ou d'un matériau rocheux, Détermination de la valeur de bleu de méthylène d'un sol ou d'un matériau rocheux par l'essai à la tache." Association Française de (Normalisation, France (in French) (1998).
- [11] Guettche Amar, mécanique des sols, cours et exercices, conformément au nouveau programme du ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique, 2015/2016.
- [12] NF, P. 94 – 071 – 1. (Août 1994). Essai de cisaillement rectiligne à la boîte – Partie 1: Cisaillement direct. Association Française de Normalisation (AFNOR).
- [13] Bouaraba, K. (2019). Caractéristiques géotechniques et hydrogéologiques des grès du Miocène (Langhien-Serravalien) De Draa Khelifa Makouda wilaya De Tizi-Ouzou ((Doctoral dissertation, Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou).