

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Mémoire de Master

Présenté à l'Université 08 Mai 1945 de Guelma

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de : Génie Civil & Hydraulique

Spécialité : Génie Civil

Option : GEOTECHNIQUE

Présenté par :

❖ Beldjazia Younes

❖ Djeroud Amine

**Thème : CARACTERISATION DES SOLS ALLEGE AVEC LES
RESIDUS DE BOIS**

Sous la direction de : M^{me} Aidoud Assia

Juin 2017

REMERCIEMENTS

Dieu merci pour le pouvoir dont vous m'avez fait part, pour terminer ce modeste travail avec succès.

Je tiens d'abord à présenter mes remerciements pour Mrs le président et membres de jury d'avoir bien voulu accepter de juger mon travail.

Mes sincères remerciements vont également à mon Encadreuse : Mme Aidoud Assia, pour leurs aides et leurs conseils durant le temps de la préparation de ce travail.

Toutes mes remerciements au directeur de laboratoire de Génie de travaux public d'EST de Constantine: Mr Cheriaf Yassine, qui a mis le laboratoire à notre disposition pour pouvoir réaliser nos essais.

Mes vifs remerciements :

- Au chef département de Génie Civil ainsi qu'à tous les enseignants qui ont contribué à notre formation.
- A toute personne ayant participé de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.

Le Sommaire :

Chapitre I	recherche Bibliographique	page
I. Introduction		1
I.1. Sols		2
I.2. Les différents types de sols		2
I.3. Sables :		2
I.3.1. Définition :		2
I.3.2. Les différents types de sables.....		3
I.3.3. Quelques Caractéristique spécifiques des sables.....		3
I.4. Argiles.....		5
I.4.1. Définition.....		5
I.4.2. Les différents types d'argile.....		5
I.4.3. Quelques Caractéristiques spécifiques d'argile.....		6
I.5. Caractéristiques physiques des sols.....		7
I.5.1. Les paramètres dimensionnels (poids volumiques)		7
I.5.2. Les paramètres sans dimensions (paramètres d'état)		7
I.6. Caractéristiques granulométriques des sols.....		8
I.7. Structure des sols.....		9
I.7.1. Structure des sols pulvérulents.....		9
I.7.2. Structure des argiles.....		9
I.8. Consistance des sols fins.....		10
I.8.1. Définition.....		10
I.8.2. Les états de consistance.....		10

I.9. Les caractéristiques mécaniques.....	13
I.9.1 la résistance au cisaillement	13
I.10. Classification des sols.....	14
I.10.1. Classification triangulaire.....	15
I.10.2. classification (LPC/USCS)	16
I.10.3. Classification LPC modifiée.....	19
I.10.4. Classification selon la nomenclature GTR.....	19
I.11. Bois.....	23
I.11.1. Définition.....	23
I.11.2. Quelques caractéristiques chimiques et physiques du bois.....	23
I.11.3. Les différents types de bois.....	23
I.11.4. Le Pin.....	23
I.11.5. Quelques caractéristiques physiques et mécaniques du bois.....	24
I.11.6. Les résidus de bois.....	24

Chapitre II

Etude Expérimentale

II.1. Introduction	26
II.2. Sable	26
II.2.1 Equivalent de Sable	26
II. 2.2. Analyse granulométrique.....	31
II.2.3 Cisaillement	36
II.3.Argile :	40
II. 3.1 Analyse granulométrique	40
II.3.2 la teneur en eau	41
II.3.3.Limite d'atterberg	42
II.3.4.Masse volumique	46

II. 3.5.Cisaillement.....	49
II.4. Conclusion	50

Chapitre III

Interprétations Des Essai

III.1 Introduction	51
III.2 la masse Volumique	51
III-3 Cisaillement	52
III.3.1 Argile.....	52
III.3.2.Sable	53
III.3.4.Limites d'atterberg	55
III.3.5.Comparaison entre les deux sols.....	57
Conclusion générale	59

Résumé

Ce travail rentre dans le cadre de la réalisation des études en géotechnique . Il consiste à faire une caractérisation des sols allégés avec les résidus de bois.

La méthodologie adoptée dans ce travail consiste à utiliser deux types de sol différents, l'un est le sable (sol pulvérulent) et l'autre est l'argile (sol cohérent) à l'aide des essais au laboratoire (équivalent de sable, analyse granulométrique et la teneur en eau.....) pour pouvoir en premier lieu faire la classification des deux sols, et déterminer l'angle de frottement et la cohésion des deux sols au cisaillement en deuxième lieu.

Un ajout de 5% et 10% du résidu de bois a été choisi , l'influence de ces deux ajouts sur les caractéristiques des deux sols a été étudiée.

Les résultats obtenus montrent que l'ajout de 5% est favorable pour l'argile mais défavorable pour le sable, alors que l'ajout de 10% rend les caractéristiques des résidus de bois dominantes avec une perturbation de ces des deux sols.

Mots clé : sol, sable, argile, bois, résidu.

Abstract

This work falls within the framework of the realization of geotechnical studies. It consists of a characterization of the lighter soils with the wood residues.

The methodology used in this work consists of using two different soil types, one is sand (pulverized soil) and the other is clay (cohesive soil) using laboratory tests (sand equivalent, particle size analysis and water content ...) in order to be able to classify the two soils first, and to determine the angle of friction and the cohesion of the two soils in the second place.

An addition of 5% and 10% of the wood residue was chosen, the influence of these two additions on the characteristics of the two soils was studied.

The results show that the addition of 5% is favorable for the clay but unfavorable for the sand, whereas the addition of 10% makes the characteristics of the wood residues dominant with a disturbance of these two soils.

Key words: soil, sand, clay, wood, residue.

ملخص:

يندرج هذا العمل في إطار أعمال الدراسات الجيوتقنية. أنها تنطوي على صنع توصيف التربة يخفف مع بقايا الخشب المنهجية المستخدمة في هذا العمل هو استخدام نوعين مختلفين من التربة، واحد هو الرمل (مسحوق الأرض)، والآخر هو الطين (التربة متماسكة) مع المعونة من الاختبارات المعملية (ما يعادل الرمال، تحليل حجم الجسيمات ومحتوى الماء..... ..) من أجل جعل أولا تصنيف من طابقين، وتحديد زاوية الاحتكاك والتلاحم اثنين من التربة ثانيا القص. وقد تم اختيار إضافة 5% و 10% من بقايا الخشب، تم دراسة تأثير هذه الإضافات اثنين على خصائص التربة اثنين وأظهرت النتائج أن إضافة 5% مواتية للطين ولكن غير مواتية الرمال، في حين أن إضافة 10% تجعل خصائص بقايا الخشب المهيمنة مع اضطراب في هذه طابقين.

كلمات البحث: التربة والرمل والطين والخشب بقايا

Listes Des Figures :

Figure I.1 couches octaédriques et tétraédriques constituant l'argile.	5
Figure I.2 Etats de consistance.....	11
Figure I.3 Classification triangulaire des sols fins.....	15
Figure I.4 Classification des sols à granulométrie uniforme.....	16
Figure I.5 Classification LPC des sols fins en laboratoire	18
Figure II.1 Schéma de l'essai de l'équivalent de sable.	29
Figure II.2 placement des tamis par ordre.....	34
Figure II.3 la courbe granulométrique du Sable.....	35
Figure II.4 Boite de Cisaillement.....	36
Figure II.5 Une Boite de Cisaillement Carré.....	37
Figure II.6 Les Boites de cisaillement a saturation (UU)	37
Figure II.7 Boite de Casagrand.....	43
Figure II.8 L'échantillon après Malaxage	44
Figure II.9 Limite de Plasticité.....	45
Figure II.10 Pycnomètre.....	47
Figure II.11 L'échantillon avant d'ébullition.....	47
Figure II.12 l'échantillon Dans le cas d'ébullition.....	47
III.1 L'évolution de la masse volumique de l'Argile en fonction du résidu de bois...51	
Figure III.2 L'évolution de l'angle de frottement de l'Argile	52
Figure III.3 L'évolution de La Cohésion (Argile)	53
Figure III.4 L'évolution de L'angle de Frottement (Sable)	54
Figure III.5 L'évolution de la Cohésion (Sable)	54
Figure III.6 L'évolution DE WL	55
Figure III.7 L'évolution de WP.....	55

Figure III.8 Histogramme d'IP.....	56
Figure III.9 Histogramme d'Ic et IL.....	56
Figure III.10 L'évolution de la cohésion de les deux sols	57
Figure III.11 L'évolution de L'angle de frottement des deux sols.....	58

Liste Des Tableaux

Tableau I.1 Familles d'argile et leurs caractéristiques.....	6
Tableau I.2 Appellation des sols selon la proportion des types de sols.....	8
Tableau I.3 Classes de granulométrie de sols.....	9
Tableau I.4 Type de sol en fonction de I_p	12
Tableau I.5 Etat de consistance du sol en fonction de I_c	12
Tableau I.6 Etat de consistance du sol en fonction de « I_L »	12
Tableau I.7 Ordres de grandeur selon GTR 92.....	13
Tableau I.8 Valeurs du coefficient K.....	14
Tableau I.9 Classification L.P.C des sols grenus.....	17
Tableau I.10 Classification L.P.C des sols organique.....	19
Tableau I.11 Classification GTR des sols	20
Tableau I.12 Classification GTR des sols fins.....	20
Tableau I.13 Classification GTR des sols sableux ou graveleux, avec fines.....	21
Tableau I.14 Classification GTR des sols comportant des fines et des gros éléments.....	22
Tableau I.15 Classification GTR des sols comportant insensibles à l'eau.....	22
Tableau I.16 caractéristiques physiques et mécaniques de quelques bois	24
Tableau I.17 Concentrations de métaux lourds dans 2 types de bois	25
Tableau II.1 Tableau de Classification des sols selon E.s.....	30
Tableau II.2 les Résultats de l'essai d'ES.....	30
Tableau II.3 échelles des tamis.....	33
Tableau II.4 résultat d'essai de granulométrie.....	34
Tableau II.5 Les Résultats De L'essai de Cisaillement.....	39
Tableau II.6 Résultats d'essai de Cisaillement avec résidu de bois	39
Tableau II.7 Les résultat d'essai de granulométrie (argile)	40
Tableau II.8 Résultats D'essai De la limite d'atterberg.....	45

Tableau II.9 Résultats D'essai De la limite d'atterberg avec résidu de bois.....	45
Tableau II.10 Résultats de l'essai de la masse Volumique.....	48
Tableau II.11 Les résultats de cisaillement sans ajout de bois.....	49
Tableau II.12 Les résultats de cisaillement quand en ajout de bois.....	49
Tableau III.1 Résultats de la masse volumique	51
Tableau III.2 Résultats de Cisaillement (Argile)	52
Tableau III.3 Résultats d'essai de Cisaillement (Sable)	53
Tableau III.4 Résultats d'essai de la limte.....	55

Chapitre I

I. Introduction :

Le sol est un mélange complexe de roches altérées (cailloux, sables, limons, argiles), de matière organique (vivante ou morte), de gaz, d'eau et de minéraux solubles, constitué au fil du temps en fonction du climat (température, humidité, vent, glace...), de la roche mère, de la topographie et des organismes vivants. [1]

Mais au-delà de ses constituants, un sol est défini par ses propriétés, principalement sa texture (proportion de sable, limon, argile) et sa structure (taille et organisation des particules entre elles), qui influent sur toutes les autres. Il existe ainsi une grande variété de sols, qui assurent des fonctions vitales pour l'humanité (croissance des végétaux, support de vie...). [1]

L'exploitation artisanale du bois des forêts communautaires en Algérie génère une quantité importante de résidus abandonnés au niveau des sites d'exploitation. Ces pièces de bois pourraient être valorisées en produits commercialisables de manière à améliorer les revenus de la communauté. De plus ils pourraient être ajoutés aux bétons à différentes destinations de la construction, comme ils pourraient restées dans les sols pour constructions. L'objectif de cette étude c'est la caractérisation des sols à résidus déjà existant et même de procédé à une étude d'amélioration des sols avec ces résidus.

Dans ce cadre la méthodologie adoptée dans ce travail est structurée en 3 chapitres :

- Le premier chapitre est une synthèse bibliographique dans on a présentés des généralités sur les sols et les bois. Ainsi que leurs caractéristiques et leurs classifications.
- Dans le deuxième chapitre, nous présentons les différentes caractéristiques des sols utilisés dans l'expérimentation.
- En fin dans le troisième chapitre, nous présentons une interprétation et une exploitation des résultats obtenus avant de terminer par une conclusion.

I.1. Sols :

Les définitions du sol sont liées à son utilisation. Pour un ingénieur civil le sol est un support sur lequel sont construites les routes et sont fondés les bâtiments. Le sol est le support de la vie terrestre. Il résulte de la transformation de la couche superficielle de la [roche-mère](#), la [croûte terrestre](#), dégradée et enrichie en apports [organiques](#) par les processus vivants. Hors des milieux marins et aquatiques d'eau douce, il est ainsi à la fois le support et le produit du vivant.

I.2. Les différents types de sols :

SOL ARGILEUX : Avec comme principal composant l'argile, c'est une terre lourde qui retient énormément l'eau. Elle est difficile à travailler mais est généralement assez fertile.

SOL CALCAIRE : Appelé également terre crayeuse, le principal composant est la chaux. Terre peu appréciée des jardiniers, elle est également détestée par de nombreux végétaux.

SOL HUMIFERE : C'est une terre très riche en humus qui est le résultat de la décomposition de matières organiques végétales. Facile à travailler elle présente peu d'inconvénients.

• **SOL LIMONEUX** : Avec le limon comme composant principal c'est une terre riche et facile à travailler. Par contre elle est instable et fragile.

• **SOL SABLEUX** : Appelé également sol siliceux, c'est une terre principalement constituée par du sable. Si elle est facile à travailler, c'est une terre instable et peu fertile. [2]

I.3. Sables :

I.3.1. Définition :

est un [matériau granulaire](#) constitué de petites particules provenant de la désagrégation d'autres [roches](#) dont la dimension est comprise entre 0,063 ([limon](#)) et 2 mm ([gravier](#)) selon la définition des matériaux granulaires en [géologie](#). Sa composition peut révéler jusqu'à 180 minéraux différents ([quartz](#), [micas](#), [feldspaths](#)) ainsi que des débris [calcaires](#) de [coquillage](#) et de [corail](#). [3]

I.3.2. Les différents types de sables : [4]

On distingue les sables naturels et les sables artificiels.

a).Sables naturels :

Les sables naturels peuvent être issus des rivières. Également appelé « **sable des rivières** » ou « sable alluvionnaire », il se caractérise par sa forme arrondie et sa dureté, et il provient de l'action de l'eau sur les rochers.

Un autre type de sable naturel est le **sable de carrière**, extrait des sablonnières et à la forme angulaire. Le sable de carrière est soit retiré du sol en masse, soit fabriqué à partir de roches extraites en carrière.

Quant au **sable de mer**, qui provient de roches sous-marines, il est particulièrement chargé en sel. L'utilisation de ce type de sable nécessite un rinçage minutieux et peut être à l'origine d'éventuelles efflorescences.

Enfin, le **sable de feuilles** est un sable fin, comportant de nombreux vides d'air qui imposent lors de son utilisation une association avec d'autres sables. Ce sable est récupéré sur les reliefs montagneux.

b).Sables artificiels :

Les sables artificiels comprennent les sables résultant du concassage de blocs de laitier des hauts-fourneaux, le sable concassé obtenu de façon identique mais sans filler, le laitier granulé ayant subi un refroidissement rapide, et le laitier broyé obtenu à partir du concassage du laitier granulé.

I.3.3. Quelques Caractéristique spécifiques des sables :

Une particule individuelle est appelée grain de sable. Les sables sont identifiés grâce à la [granulométrie](#) (la grosseur des grains). Le sable se caractérise par sa capacité à s'écouler. Plus les grains sont ronds, plus le sable s'écoule facilement. Le sable artificiel, obtenu par découpage ou broyage mécanique de roches, est principalement composé de grains aux aspérités marquées. On peut également différencier un sable qui a été transporté par le vent d'un sable transporté par l'eau. Le premier est de forme plus ronde, sphérique, alors que le deuxième est plus ovoïde. De plus, le sable éolien présente une diaphanéité plus mate que le sable fluviatile ou marin qui est dit "émoussé-luisant". L'aspect de la surface du grain de sable éolien est dû aux multiples impacts que subit le sable lors de son déplacement. Le sable est souvent le produit de la décomposition du micaschiste du fait de l'[érosion](#). Ainsi, le plus fréquent de ses composants est le [quartz](#), constituant le moins altérable du granite, ainsi que des micas et feldspaths. Un sable

issu d'une [roche volcanique](#) est plutôt noir tandis qu'un sable marin s'enrichit de débris de coquillages. Il peut avoir plusieurs couleurs en fonction de sa nature : noir ou blanc (exemple de sable blanc : [gypse](#), [White Sands](#)). Le sable peut aussi prendre d'autres formes : [arène](#), [grès](#). Les grains de sable sont assez légers pour être transportés par le [vent](#) et l'[eau](#). Ils s'accumulent alors pour former des [plages](#), des [dunes](#). Un vent violent qui se charge en sable est une « [tempête de sable](#) ». Les grains les plus lourds se déposent en premier dans les milieux à forte énergie (rivière, haut d'une plage), les plus fins dans les milieux à énergie plus faible (delta, lac, bassin, crique).

La masse volumique du sable sec varie, selon sa granulométrie et sa composition, de 1,7 à 1,9 kg/l (en moyenne 1 850 kg/m³).

I.4. Argiles : [5]

I.4.1. Définition :

L'argile désigne une matière rocheuse naturelle à base de [silicates](#) et/ou d'[aluminosilicates](#) hydratés de structure lamellaire, provenant en général de l'altération de silicates à charpente tridimensionnelle, tels que les [feldspaths](#).

Dans un sens étendu, il s'agit aussi d'un [sédiment](#) composé de particules fines issues de l'altération de diverses roches, parfois des roches sédimentaires argileuses métamorphisées en schistes.

I.4.2. Les différents types d'argile : [6]

Les argiles sont composées d'alumino-silicates hydratés. Les grains solides ont une forme de plaquette. Ils sont formés par un empilement de feuillets (composés d'une superposition de couches octaédriques et tétraédriques constituées par un maillage d'ions Si, O, OH, Al et Mg):

- les feuillets 1/1 sont formés d'une couche tétraédrique et d'une couche octaédrique (kaolinite),
- les feuillets 2/1 sont formés d'une couche octaédrique entourée de deux couches tétraédriques (illite, smectite).

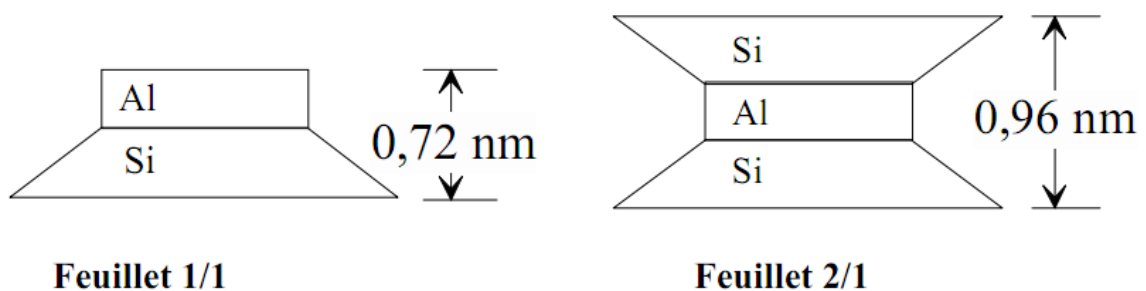
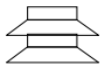
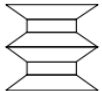
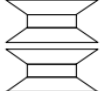


Figure I.1 : Les couches octaédriques et tétraédriques constituant l'argile.

Tableau I.1: Familles d'argile et leurs caractéristiques

Noms	Feuillets élémentaires	Nombre de feuillets par particule	Dimension d'une particule l x e (μm x μm)	Surface spécifique (m ² /g)
Kaolinite		100 – 150	1 x 0,1	20 - 70
Illite		10	0,3 x 0,01	10 - 40
Montmorillonite		1	0,1 x 0,01	100

I.4.3. Quelques Caractéristiques spécifiques d'argile : [7]

Les sols dits « argileux » comprennent les limons (silts) et les argiles qui sont par définition des sols à grains fins dont plus de 50 % de leur poids sec est constitué de particules inférieures à 0,075 mm. Leur consistance peut varier de très molle à dure. Ils sont caractérisés par des teneurs en eau habituellement élevées, ce qui les rend généralement compressibles, indépendamment de leur consistance.

De plus, ils sont sensibles au gel et peuvent subir des variations de volume lors de modifications climatiques comme en période de sécheresse. La plupart des maisons québécoises sont construites avec un soubassement. Les fondations sont ainsi protégées du gel. Les problèmes de tassement deviennent habituellement négligeables car la charge transmise au sol par la maison est amplement compensée par l'enlèvement des sols au droit du soubassement.

Toutefois, les fondations construites sur des sols argileux de faible consistance ou sur des sols organiques ou remblayés – de même que les charges concentrées comme celles d'une cheminée en maçonnerie ou une fondation constituée seulement d'une dalle de béton construite en surface du sol (comme pour les garages, par exemple) – doivent toujours faire l'objet d'une attention spéciale. Il est donc requis de vérifier les conditions du sol au moment de la construction et de prendre les mesures appropriées pour éviter ou limiter les dommages structuraux qui risquent de se produire.

Nous savons que l'adjonction d'argiles rend plus ou moins rapidement les terres imperméables, au contraire du sable fin perméable. Une terre argileuse peut être lourde et compacte, résistante

et difficile au labour, se durcissant en croûtes épaisses parfois plus ou moins craquelées lors des sécheresses.

I.5. Caractéristiques physiques des sols:

Avant d'analyser le comportement mécanique des sols, il est nécessaire de définir certains paramètres qui se rapportent aux diverses proportions dans lesquelles se trouvent les squelettes solide, l'eau et l'air constituant le sol. [8]

I.5.1. Les paramètres dimensionnels (poids volumiques) : [9]

- **le poids volumique des particules solides :** (de la matière constituant les grains solides), noté γ_s ; sable et argile = 26 à 27 kN/m³
- **le poids volumique du sol :** (ou poids volumique apparent ou poids volumique humide), noté γ . sable = 17 à 20 kN/m³, argile = 16 à 22 kN/m³
- **le poids volumique du sol sec, noté γ_d :** sable = 14 à 18 kN/m³, argile = 10 à 20 kN/m³ Si le sol est sec : $\gamma = \gamma_d$.
- **le poids volumique du sol saturé, noté γ_{sat} :** lorsque tous les vides sont remplis d'eau. γ_{sat} ; sable et argile = 19 à 22 kN/m³
- **le poids volumique du sol déjaugé, noté γ' :** Il est pris en compte lorsque le sol est entièrement immergé. Il tient compte de la présence de l'eau qui remplit tous les vides et de la poussée d'Archimède ; sable et argile = 9 à 12 kN/m³

On introduit aussi la notion masse volumique, notée ρ , et plus rarement celle de densité par rapport à l'eau, notée D_i .

I.5.2. Les paramètres sans dimensions (paramètres d'état) : [9]

- **la porosité :** notée n , qui permet de connaître l'importance des vides c'est-à-dire de savoir si le sol est dans un état lâche ou serré. Elle est définie comme étant le rapport du volume des vides au volume total ; sable : $n = 0.25$ à 0.5 , argile : $n = 0.20$ à 0.80

La porosité est toujours inférieure à 1. Elle peut aussi être exprimée en pour-cent.

- **l'indice des vides :** noté e , dont la signification est analogue à celle de la porosité ; sable : $e = 0.5$ à 1 , argile : $n = 0.3$ à 1

L'indice des vides peut être supérieur à 1 et même atteindre la valeur 13 (cas extrême des argiles de Mexico).

- **La teneur en eau :** notée w , est définie par le rapport du poids de l'eau au poids des particules solides d'un volume donné de sol; sable: $w = 1$ à 15% , argile : $w = 10$ à 20%

- **Le degré de saturation** : noté S_r , indique dans quelle proportion les vides sont remplis par l'eau. Le degré de saturation peut varier de 0% (sol sec) à 100% (sol saturé).
- **Densité relative ou indice de densité** : L'indication de l'indice de densité permet d'avoir une idée sur l'état de compacité d'un sol donné : $I_d = 0$ pour l'état le plus lâche ($e = e_{max}$) et $I_d = 1$ pour l'état le plus compact ($e = e_{min}$).

I.6. Caractéristiques granulométriques des sols :

Pour bien décrire un sol, il faut donc connaître sa granulométrie, c'est-à-dire la répartition de ses particules suivant leurs diamètres équivalents. Deux essais de laboratoire permettent d'établir la granulométrie des sols

- l'analyse granulométrique par tamisage ;
- l'analyse granulométrique par sédimentation.

Tableau I.2: Appellation des sols selon la proportion des types de sols.

Proportion des types de sols	Terminologie	Exemples
> 35%	Nom	Gravier, sable, silt, etc.
20% à 35%	Adjectif	Graveleux, sableux, etc.
10% à 20%	Un peu	Un peu de silt, de sable, etc.
< 10%	Des traces	Avec des traces d'argiles, de silt, etc.

La granulométrie d'un sol peut être caractérisée par le coefficient d'uniformité (coefficient de Hazen), et le coefficient de courbure. Le premier permet d'exprimer l'étalement de la courbe granulométrique et le deuxième permet de décrire la forme de la courbe granulométrique.

Tableau I.3: Classes de granulométrie de sols.

coefficient d'uniformité	classes de granulométrie
$Cu \leq 2$	granulométrie très serrée.
$2 < Cu \leq 5$	granulométrie serrée.
$5 < Cu \leq 20$	granulométrie semi-étalée.
$20 < Cu \leq 200$	granulométrie étalée.
$200 < Cu$	granulométrie très étalée.

I.7. Structure des sols : [8]

I.7.1. Structure des sols pulvérulents : (sols grenus)

$D > 20 \mu\text{m}$ (exemple: les sables).

Les grains se détachent les uns des autres sous leur poids.

Les principales forces intervenant dans l'équilibre de la structure sont les forces de pesanteur; c'est par des réactions de contact grain à grain qu'un ensemble stable peut exister.

Cette stabilité sera d'autant meilleure que le nombre de contacts sera élevé (sol bien gradué).

Dans le cas de sols humides non saturés: l'eau est retenue, sous forme de ménisques au voisinage des points de contacts entre les grains, par des forces de capillarité; elle crée entre ces derniers des forces d'attraction. Le matériau présente une cohésion capillaire (châteaux de sable). Les forces capillaires sont négligeables devant les forces de pesanteur.

I.7.2. Structure des argiles : (sols cohérent)

$D < 2 \mu\text{m}$.

Les particules restent collées les une aux autres. Le sol présente une cohésion: il a l'apparence d'un solide et ne se désagrège pas sous l'effet de la pesanteur ou d'autres forces appliquées. Les particules sont formées par un empilement de feuillets. Elles ont une forme de plaquettes.

La surface des plaquettes étant chargée négativement, les particules sont soumises à des forces d'attraction inter-granulaires diverses: forces électriques, forces de Van der Waals. Ces forces sont en général faibles et diminuent rapidement lorsque la distance augmente, on admet qu'elles sont négligeables à partir d'une distance de $0,4 \mu\text{m}$. Pour qu'elles puissent avoir une influence sur le comportement du sol il est nécessaire que les grains de ce sol aient des dimensions très petites. Il se crée autour des particules de sol une pellicule d'eau adsorbée ou eau liée d'épaisseur à peu près constante ($= 0,01 \mu\text{m}$). Elle est maintenue

à la surface des grains par des forces d'attraction moléculaires. Les dipôles d'eau sont orientés perpendiculairement à la surface des grains. Cette eau présente des propriétés très différentes de celles de l'eau libre:

- elle a une très forte densité: 1,5
- elle est liée à la particule (elle ne se déplace pas sous l'effet de la gravité),
- sa viscosité très élevée, qui lui confère des propriétés intermédiaires entre celles d'un liquide et celles d'un solide, est à l'origine de certains comportements des sols argileux: fluage, compression secondaire, ...
- elle ne s'évacue qu'à température élevée (vers 300°C.).

La couche d'eau adsorbée joue un rôle de lubrifiant entre les grains. Son influence est considérable sur les propriétés mécaniques du sol.

I.8. Consistance des sols fins : (limites d'Atterberg) [9]

I.8.1. Définition :

La consistance que l'on peut définir comme un état de fermeté, est liée aux forces de cohésion entre les particules et ne concerne donc que les sols cohérents. Elle a une influence sur la résistance aux déformations.

I.8.2. Les états de consistance :

On distingue quatre états de consistance :

- L'état solide:** Lorsque le sol est à l'état solide, ses particules sont en contact les unes avec les autres, et les films d'eau adsorbée sont très minces et se touchent: il n'y a pas d'eau libre entre les particules. L'assèchement du sol ne produit aucun retrait. Le sol manifeste une très grande résistance au cisaillement et, sous l'effet d'une charge, les déformations sont faibles avant qu'il ait rupture. En génie civil, on parle de sol ayant un comportement fragile, similaire à celui de la brique.
- L'état semi-solide:** Un sol à l'état semi-solide, a une faible teneur en eau, et les liens de cohésion entre ses particules sont très forts. Les films d'eau adsorbée, quoique encore minces, séparent légèrement les particules, de telle sorte qu'un assèchement du sol causerait un retrait. Il s'ensuit que les déformations du sol provoquées par des charges sont toujours accompagnées de fissures.
- L'état plastique:** Lorsque le sol est à l'état plastique, sa teneur en eau est plus grande et ses particules sont plus éloignées les unes des autres. Les films d'eau adsorbée sont beaucoup plus

épais, mais ils se touchent encore ; la cohésion du sol est plus faible qu'à l'état semi-solide. Sous de petites charges, le sol se déforme sans fissures. Sa consistance varie de celle du beurre mou à celle du massif ferme: c'est un sol qu'on peut façonner à la main.

- d) **L'état liquide:** Lorsque le sol est à l'état plastique, sa teneur en eau est si élevée qu'il n'existe pratiquement plus aucune cohésion entre les particules, qui sont entourées de leur film d'eau adsorbée et isolées les unes des autres par l'eau libre. Le sol peut alors se comporter comme un liquide visqueux d'une consistance variant de celle de la soupe aux pois à celle du beurre mou.

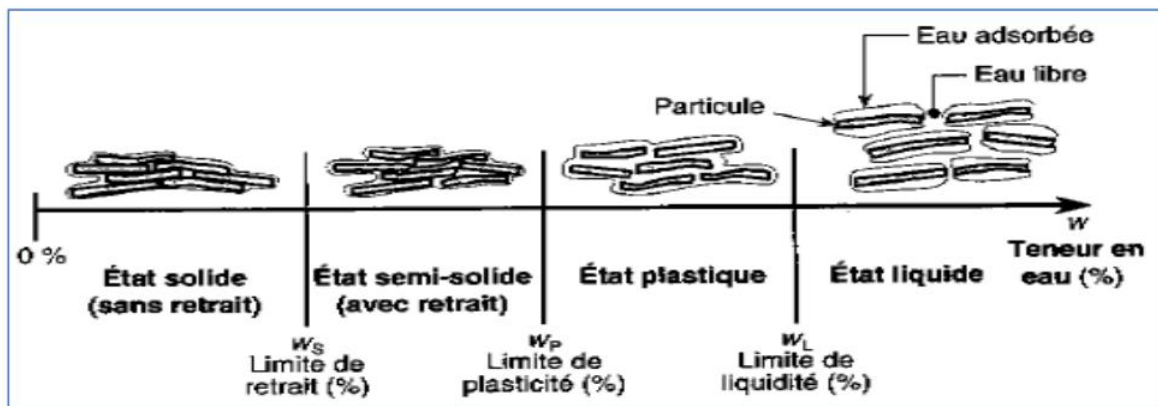


Figure I.2: Etats de consistance

La transition d'un état à un autre est très progressive, c'est pourquoi toute tentative pour fixer la limite entre deux états comporte une part d'arbitraire. Néanmoins, on utilise les limites définies par Atterberg et précisées ensuite par Casagrande. [8]

- **La limite de retrait (w_s):** Cette limite sépare l'état solide de l'état semi-solide.
- **La limite de plasticité (w_p):** Cette limite sépare l'état plastique de l'état semi-solide. Elle varie de 0% à 100%, mais elle demeure généralement inférieure à 40%.
- **La limite de liquidité (w_l):** est la teneur en eau qui sépare l'état liquide de l'état plastique. Elle peut atteindre 1000% dans le cas de certaines argiles, mais dans la plupart des cas elle ne dépasse pas 100%. [9]

Les limites de plasticité et de liquidité servent à identifier et à classer les sols à grains fins. Quant à la limite de retrait, elle sert à l'étude de certains sols dont le volume varie fortement à cause des changements de la teneur en eau. C'est surtout dans les régions arides, où se trouvent des dépôts de la montmorillonite (problème de retrait-gonflement). [9]

A partir de ces limites, on peut déterminer : [6]

- ❖ **L'indice de plasticité « I_p » :** $I_p = w_l - w_p$

Tableau I.4: Type de sol en fonction de I_p

Indice de plasticité (%)	Type de sol
$< 1\%$	Pulvérulent
$1\% < I_p < 7\%$	Sable argileux
$7\% < I_p < 17\%$	Argile sableuse
$I_p > 17\%$	Argile

❖ **L'indice de consistance: « I_c »** $I_c = (W_1 - W) / I_p$

Tableau I.5: Etat de consistance du sol en fonction de I_c

Indice de consistance	consistance du sol
$I_c \leq 0$	Liquide
$0 < I_c < 1$	Plastique
$I_c = 1$	Solide plastique
$I_c > 1$	Solide ou semi solide.

❖ **L'indice de liquidité « I_L »** $I_L = (W - W_p) / I_p$

Tableau I.6: Etat de consistance du sol en fonction de « I_L »

Indice de liquidité	Consistance du sol
$I_L < 0$	Très dure
$0 < I_L \leq 1$	Dure à très plastique
$I_L > 1$	Fluide

Tableau I.7: Ordres de grandeur selon GTR 92

Nature	w _L (%)	w _p (%)	I _p (%)
Limon	24	17	7
Argile limoneuse peu plastique	40	24	16
Argile plastique	114	29	85
Argile de Mexico	500	125	375
Bentonite ¹⁶	710	54	656

I.9. Les caractéristiques mécaniques :

I.9.1. La résistance au cisaillement :

La résistance au cisaillement (R) d'un sol comporte deux termes qui sont directement liés au sol et à ses caractéristiques intrinsèques : l'angle de frottement interne ϕ et la cohésion c .

Les paramètres de nature d'un sol pulvérulent interviennent dans la valeur de l'angle de frottement. Alors que l'on ne s'intéresse généralement qu'aux caractéristiques drainées des sols pulvérulents, on doit, dans le cas des sols cohésifs, examiner l'ensemble des caractéristiques drainées et non drainées. [10]

- ❖ En ce qui concerne la **cohésion**, il faut souligner le rôle important de l'eau. En effet, lorsque la quantité d'eau est très importante, les particules du sol sont séparées les unes des autres et la cohésion du sol est alors nulle. En revanche la présence d'eau peut donner une certaine cohésion, cohésion apparente, à des sols qui n'en n'ont aucune lorsqu'ils sont secs. C'est par exemple, le cas des sables, parfaitement illustré par le château de sable dont la construction n'est possible qu'avec un sable qui ne soit ni trop sec ni trop humide. Dans les argiles et limons, cette cohésion apparente peut être très élevée. A noter que les sols grossiers, comme les graviers, ont une cohésion nulle, quelle que soit leur teneur en eau.
- ❖ **L'angle de frottement interne** correspond à l'angle formé naturellement par un matériau mis en tas, par rapport à l'horizontale. Il dépend du type de sol et plus particulièrement de l'émoussé de ses grains : plus ces derniers sont anguleux, plus l'angle de frottement interne sera élevé. Ainsi, cet angle sera nettement plus élevé dans le cas de graviers que pour un sol à forte teneur en argiles.

❖ Facteurs influant sur la valeur de ϕ :

La compacité du sol influe directement sur l'angle de frottement interne ϕ . Cette influence peut être traduite par la loi empirique suivante, proposée par Caquot et Kérisel, pour la variation de $\tan\phi$ avec l'indice des vides e : $\tan \phi = K/ e$. [10]

Avec les valeurs de K indiquées dans le tableau ci-après.

Tableau I.8: Valeurs du coefficient K

Tableau 2 – Valeurs du coefficient K	
Nature du sol	Variation du coefficient K
Gros sable	0,60 à 0,55
Sable moyen	0,55 à 0,475
Sable fin	0,475 à 0,400
Sable silteux	0,400 à 0,325
Valeur moyenne admise	0,55

I.10. Classification des sols :

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. [9]

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. [9]

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. [9]

les autres sont basés sur certains essais d'identification. Parmi ces systèmes, plusieurs se réfèrent uniquement à la granularité du sol. D'autres utilisent simultanément la granularité et la plasticité du sol. [9]

I.10.1. 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.

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.

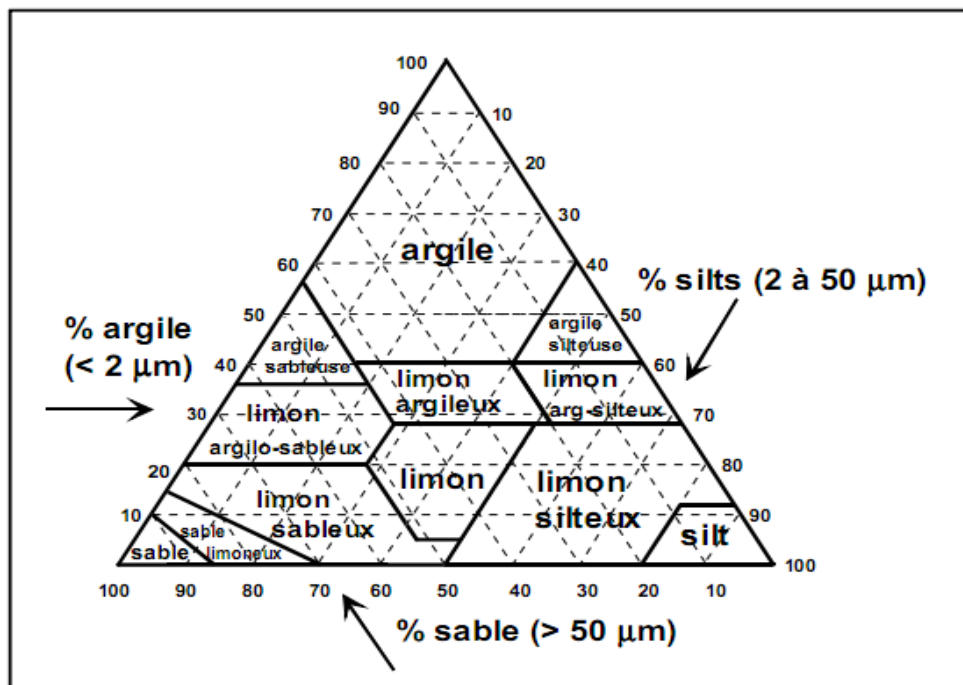


Figure I.3 : Classification triangulaire des sols fins (contenant moins de 30% d'éléments de diamètre supérieur à 2 mm)

I.10.2. Classification (LPC/USCS) : (*Unified Soil Classification System*)

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 (tamisât à 2 mm et 0,08 mm);
- la forme de la courbe granulométrique :

- coefficient d'uniformité ou de Hazen C_u ,
- coefficient de courbure C_c (ou C_z);
- les caractéristiques de plasticité W_L et I_P , et la ligne **A** d'équation :

$$I_P = 0,73 (W_L - 20) \text{ (relation de Cazagrande) ;}$$

- 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.

a)-Sols à granulométrie uniforme :

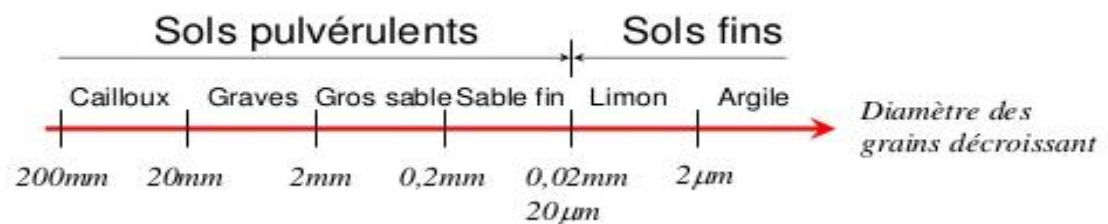


Figure I.4 : Classification des sols à granulométrie uniforme

b)-Sols à granulométrie non uniforme :

On distingue trois grands types de sols :

- les sols grenus : plus de 50 % des éléments en poids $> 80 \mu\text{m}$,
- les sols fins : plus de 50 % des éléments en poids $< 80 \mu\text{m}$,
- les sols organiques dont la teneur en matière organique est $> 10\%$.

b).1 - 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 I.9: Classification L.P.C des sols grenus. [8]

Définitions		Symboles	Conditions	Désignations géotechniques	
GRAVES	Plus de 50% des éléments > 0,08 mm ont un diamètre > 2 mm	moins de 5% d'éléments < 0,08 mm	$c_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} > 4$ et $c_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \cdot D_{60}}$ compris entre 1 et 3	grave propre bien graduée	
			Gm	Une des conditions de Gb non satisfaite	grave propre mal graduée
		plus de 12% d'éléments < 0,08 mm	GL	Limites d'Atterberg au-dessous de la ligne A ¹⁷	grave limoneuse
			GA	Limites d'Atterberg au-dessus de la ligne A ¹⁷	grave argileuse
SABLES	Plus de 50% des éléments > 0,08 mm ont un diamètre < 2 mm	moins de 5% d'éléments < 0,08 mm	$c_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} > 6$ et $c_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \cdot D_{60}}$ compris entre 1 et 3	sable propre bien gradué	
			Sm	Une des conditions de Sb non satisfaite	sable propre mal gradué
		plus de 12% d'éléments < 0,08 mm	SL	Limites d'Atterberg au-dessous de la ligne A ¹⁷	sable limoneux
			SA	Limites d'Atterberg au-dessus de la ligne A ¹⁷	sable argileux

Lorsque 5 % < % inférieur à 0,08 mm < 12 % ⇒ on utilise un double symbole

- pour les graves : Gb-GL Gb-GA Gm-GL Gm-GA
- pour les sables : Sb-SL Sb-SA Sm-SL Sm-SA

b).2- 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 (figI.5).

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 comme ils sont montrés au organigramme ci-dessous.

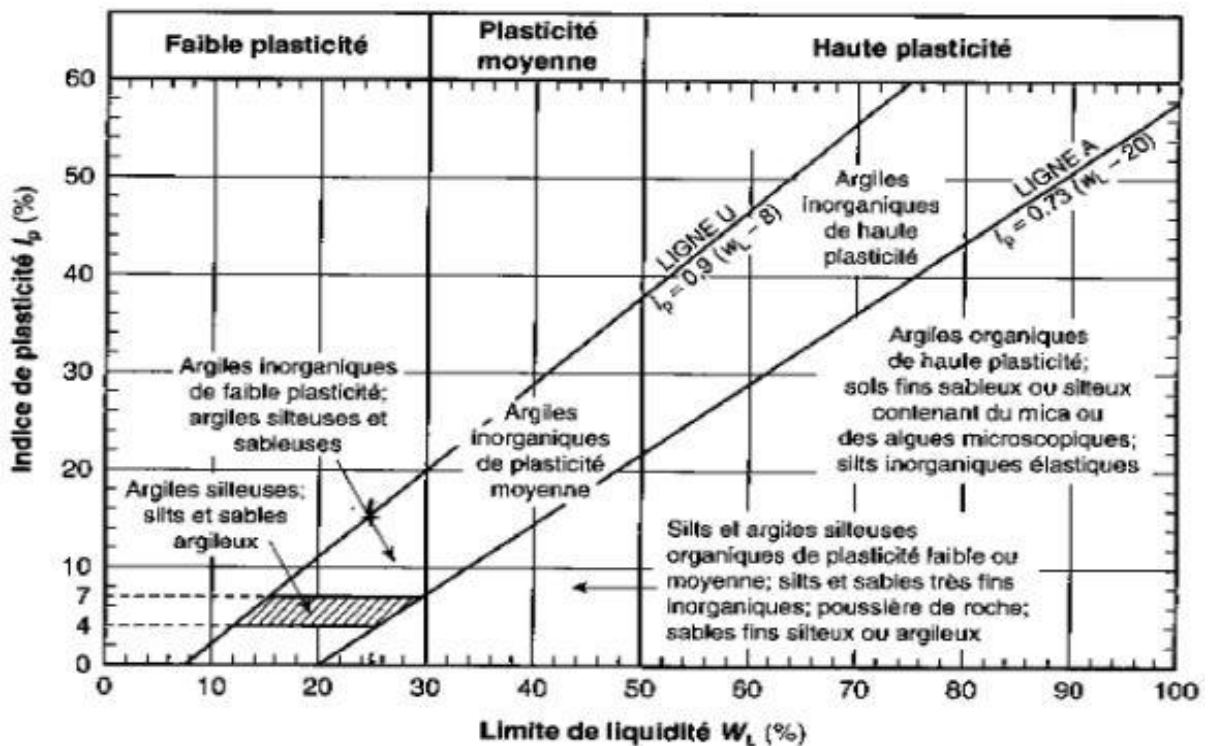
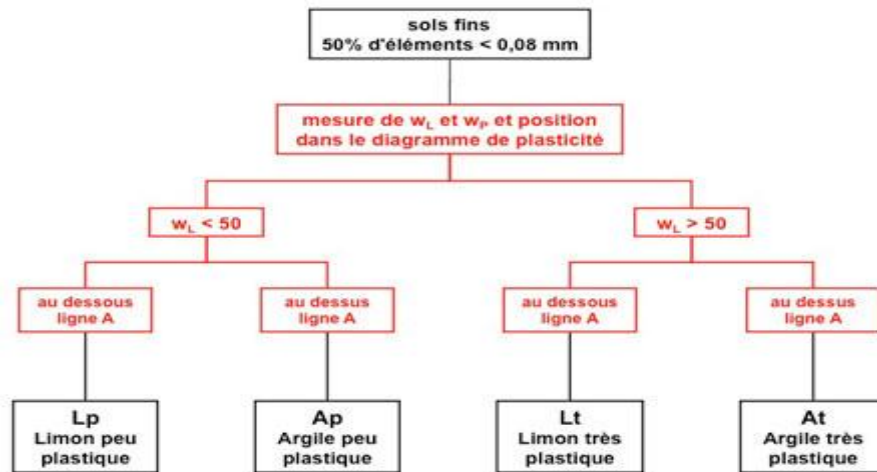


Figure I.5 : Classification LPC des sols fins en laboratoire. Diagramme de plasticité

b).3- Sols organiques : [8]

Lorsque les grains sont constitués de matière organique, le sol est dit organique. La présence dans les sols de matières organiques, qui sont à l'origine de textures lâches et d'une importante rétention d'eau, confèrent à ceux-ci une grande plasticité et une grande compressibilité. Pour des études d'ouvrages importants où le critère de compressibilité est prépondérant (remblai sur sol compressible par exemple), le dosage de matières organiques des sols appelés à supporter de tels ouvrages est indispensable.

La tourbe, résultat de la décomposition des végétaux, est un exemple de sol organique; elle est presque exclusivement composée de fibres végétales.

Tableau I.10: Classification L.P.C des sols organique. [8]

Teneur en matière organique (%)	Désignation géotechnique		
0-3	Sol inorganique		
3-10	Sol faiblement organique	fO	Vase
10 - 30	Sol moyenne organique	mO	Sol tourbeux
>30	Sol très organique	tO	Tourbe

I.10.3. Classification LPC modifiée : (1974/1980)

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 sont :

- des sols grenus : Gb, Gm, GA, GL, Sb, Sm, SA, SL
- des 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.

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 ».

I.10.4. Classification selon la nomenclature GTR : (norme NF P 11 300)

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. [9]

Tableau I.11: Classification GTR des sols

CLASSE	Définition	Caractéristique	Sous-classe
A	Sols fins	$D_{max} \leq 50$ mm et passant à $80 \mu\text{m} > 35$ %	A1 à A4 selon VBS ou I_p
B	Sols sableux et graveleux avec fines	$D_{max} \leq 50$ mm et passant à $80 \mu\text{m} \leq 35$ %	B1 à B6 selon VBS ou I_p et tamisat
C	Sols comportant des fines et des gros éléments	$D_{max} > 50$ mm et passant à $80 \mu\text{m} > 12$ % ou passant à $80 \mu\text{m} \leq 12$ % + VBS $> 0,1$	30 sous-classes selon VBS, I_p et tamisat à 50 mm
D	Sols insensibles à l'eau avec fines	VBS $\leq 0,1$ et passant à $80 \mu\text{m} \leq 12$ %	D1 à D3
R	Matériaux rocheux	voir la norme NF P 11-300	
F	Sols organiques et sous-produits industriels	voir la norme NF P 11-300	

D_{max} = diamètre pour lequel 95 % des grains du sol ont une dimension inférieure (soit D_{95} si la courbe granulométrique est disponible, sinon appréciation visuelle de la dimension des plus gros éléments).

Tableau I.12: Classification GTR des sols fins

Classe A		Tableau 1 - Classification des sols fins					
Classement selon la nature				Classement selon l'état hydrique			
Paramètres de nature Premier niveau de classification	Classe	Paramètres de nature Deuxième niveau de classification	Sous classe fonction de la nature	Paramètres d'état	Sous classe fonction de l'état		
$D_{max} \leq 50$ mm et Tamisat à $80 \mu\text{m} > 35\%$	A	$VBS \leq 2,5$ ⁽¹⁾ OU $I_p \leq 12$	A₁ Limos peu plastiques, loess, silt alluvionnaires, sables fins peu pollués, arènes peu plastiques...	IPI ⁽¹⁾ ≤ 3 OU $W_n \geq 1,25 W_{OPN}$	A ₁ th		
				$3 < IPI$ ⁽¹⁾ ≤ 8 OU $1,10 \leq W_n < 1,25 W_{OPN}$	A ₁ h		
				$8 < IPI \leq 25$ OU $0,9 W_{OPN} \leq W_n < 1,1 W_{OPN}$	A ₁ m		
				$0,7 W_{OPN} \leq W_n < 0,9 W_{OPN}$ $W_n < 0,7 W_{OPN}$	A ₁ s A ₁ ts		
		$12 < I_p \leq 25$ ⁽¹⁾ OU $2,5 < VBS \leq 6$	A₂ Sables fins argileux, limons, argiles et marnes peu plastiques arènes...	IPI ⁽¹⁾ ≤ 2 OU I_c ⁽¹⁾ $\leq 0,9$ OU $W_n \geq 1,3 W_{OPN}$	A ₂ th		
				$2 < IPI$ ⁽¹⁾ ≤ 5 OU $0,9 \leq I_c$ ⁽¹⁾ $< 1,05$ OU $1,1 W_{OPN} \leq W_n < 1,3 W_{OPN}$	A ₂ h		
				$5 < IPI \leq 15$ OU $1,05 < I_c \leq 1,2$ OU $0,9 W_{OPN} \leq W_n < 1,1 W_{OPN}$	A ₂ m		
				$1,2 < I_c \leq 1,4$ OU $0,7 W_{OPN} \leq W_n < 0,9 W_{OPN}$ $I_c > 1,3$ OU $W_n < 0,7 W_{OPN}$	A ₂ s A ₂ ts		
				$25 < I_p \leq 40$ ⁽¹⁾ OU $6 < VBS \leq 8$	A₃ Argiles et argiles mameuses, limons très plastiques...	IPI ⁽¹⁾ ≤ 1 OU I_c ⁽¹⁾ $\leq 0,8$ OU $W_n \geq 1,4 W_{OPN}$	A ₃ th
						$1 < IPI$ ⁽¹⁾ ≤ 3 OU $0,8 \leq I_c$ ⁽¹⁾ < 1 OU $1,2 W_{OPN} \leq W_n < 1,4 W_{OPN}$	A ₃ h
						$3 < IPI \leq 10$ OU $1 < I_c \leq 1,15$ OU $0,9 W_{OPN} \leq W_n < 1,2 W_{OPN}$	A ₃ m
						$1,15 < I_c \leq 1,3$ OU $0,7 W_{OPN} \leq W_n < 0,9 W_{OPN}$ $I_c > 1,3$ OU $W_n < 0,7 W_{OPN}$	A ₃ s A ₃ ts
		$I_p > 40$ ⁽¹⁾ OU $VBS > 8$	A₄ Argiles et argiles mameuses, très plastiques...	Valeurs seuils des paramètres d'état, à définir à l'appui d'une étude spécifique		A ₄ th	
						A ₄ h	
						A ₄ m	
						A ₄ s	

Tableau I.13: Classification GTR des sols sableux ou graveleux, avec fines

(¹) Paramètres dont le choix est à privilégier

<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block;">Classe B</div> Tableau 2 - Classification des sols sableux ou graveleux, avec fines							
← CLASSIFICATION A UTILISER POUR LES REMBLAIS →							
← CLASSIFICATION A UTILISER POUR LES COUCHES DE FORME →							
Classement selon la nature				Classement selon l'état hydrique		Classement selon le comportement	
Paramètres de nature Premier niveau de classification	Classe	Paramètres de nature Deuxième niveau de classification	Sous classe fonction de la nature	Paramètres d'état	Sous classe fonction de l'état	Paramètres de comportement	sous classe fonction du comportement
D _{max} ≤ 50 mm et Tamisat à 80 µm ≤ 35%	Sols sableux et graveleux avec fines	tamisat à 80 µm ≤ 12% tamisat à 2 mm > 70% 0,1 ≤ VBS ≤ 0,2	B₁ Sables silteux...	Matériaux généralement insensibles à l'eau		FS ≤ 60	B ₁₁
						FS > 60	B ₁₂
		tamisat à 80 µm ≤ 12% tamisat à 2 mm > 70% VBS > 0,2	B₂ Sables argileux (peu argileux)...	IPI (¹) ≤ 4 ou W _n ≥ 1,25 W _{OPN}	B ₂ th	FS ≤ 60	B ₂₁ th
						FS > 60	B ₂₂ th
				4 < IPI (¹) ≤ 8 ou 1,10 W _{OPN} ≤ W _n < 1,25 W _{OPN}	B ₂ h	FS ≤ 60	B ₂₁ h
						FS > 60	B ₂₂ h
				0,9 W _{OPN} ≤ W _n < 1,10 W _{OPN}	B ₂ m	FS ≤ 60	B ₂₁ m
						FS > 60	B ₂₂ m
		0,5 W _{OPN} ≤ W _n < 0,9 W _{OPN}	B ₂ s	FS ≤ 60	B ₂₁ s		
				FS > 60	B ₂₂ s		
W _n < 0,5 W _{OPN}	B ₂ ts	FS ≤ 60	B ₂₁ ts				
		FS > 60	B ₂₂ ts				
tamisat à 80 µm ≤ 12% tamisat à 2 mm > 70% 0,1 ≤ VBS ≤ 0,2	B₃ Graves silteuses...	Matériaux généralement insensibles à l'eau		LA ≤ 45 et MDE ≤ 45	B ₃₁		
				LA > 45 et MDE > 45	B ₃₂		

(¹) Paramètres dont le choix est à privilégier

<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block;">Classe B (suite)</div> Tableau 2 - Classification des sols sableux ou graveleux, avec fines							
← CLASSIFICATION A UTILISER POUR LES REMBLAIS →							
← CLASSIFICATION A UTILISER POUR LES COUCHES DE FORME →							
Classement selon la nature				Classement selon l'état hydrique		Classement selon le comportement	
Paramètres de nature Premier niveau de classification	Classe	Paramètres de nature Deuxième niveau de classification	Sous classe fonction de la nature	Paramètres d'état	Sous classe fonction de l'état	Paramètres de comportement	sous classe fonction du comportement
D _{max} ≤ 50 mm et Tamisat à 80 µm ≤ 35%	Sols sableux et graveleux avec fines	tamisat à 80 µm ≤ 12% tamisat à 2 mm ≤ 70% VBS > 0,2	B₄ Graves argileuses (peu argileuses)...	IPI (¹) ≤ 7 ou W _n ≥ 1,25 W _{OPN}	B ₄ th	LA ≤ 45 et MDE ≤ 45	B ₄₁ th
						LA > 45 et MDE > 45	B ₄₂ th
				7 < IPI (¹) ≤ 15 ou 1,10 W _{OPN} ≤ W _n < 1,25 W _{OPN}	B ₄ h	LA ≤ 45 et MDE ≤ 45	B ₄₁ h
						LA > 45 et MDE > 45	B ₄₂ h
				0,9 W _{OPN} ≤ W _n < 1,10 W _{OPN}	B ₄ m	LA ≤ 45 et MDE ≤ 45	B ₄₁ m
						LA > 45 et MDE > 45	B ₄₂ m
		0,6 W _{OPN} ≤ W _n < 0,9 W _{OPN}	B ₄ s	LA ≤ 45 et MDE ≤ 45	B ₄₁ s		
				LA > 45 et MDE > 45	B ₄₂ s		
		W _n < 0,6 W _{OPN}	B ₄ ts	LA ≤ 45 et MDE ≤ 45	B ₄₁ ts		
				LA > 45 et MDE > 45	B ₄₂ ts		
		tamisat à 80 µm compris entre 12 et 35% tamisat à 2 mm ≤ 70% VBS < 1,5 (¹) ou I _p ≤ 12	B₅ Sables et graves très silteux...	IPI (¹) ≤ 5 ou W _n ≥ 1,25 W _{OPN}	B ₅ th	LA ≤ 45 et MDE ≤ 45	B ₅₁ th
						LA > 45 et MDE > 45	B ₅₂ th
				5 < IPI (¹) ≤ 12 ou 1,1 W _{OPN} ≤ W _n < 1,25 W _{OPN}	B ₅ h	LA ≤ 45 et MDE ≤ 45	B ₅₁ h
						LA > 45 et MDE > 45	B ₅₂ h
				12 < IPI (¹) ≤ 30 ou 0,9 W _{OPN} ≤ W _n < 1,10 W _{OPN}	B ₅ m	LA ≤ 45 et MDE ≤ 45	B ₅₁ m
						LA > 45 et MDE > 45	B ₅₂ m
		0,6 W _{OPN} ≤ W _n < 0,9 W _{OPN}	B ₅ s	LA ≤ 45 et MDE ≤ 45	B ₅₁ s		
				LA > 45 et MDE > 45	B ₅₂ s		
W _n < 0,6 W _{OPN}	B ₅ ts	LA ≤ 45 et MDE ≤ 45	B ₅₁ ts				
		LA > 45 et MDE > 45	B ₅₂ ts				
tamisat à 80 µm compris entre 12 et 35% VBS > 1,5 (¹) ou I _p > 12	B₆ Sables et graves argileux à très argileux	IPI (¹) ≤ 4 ou W _n ≥ 1,3 W _{OPN} ou I _p ≤ 0,8	B ₆ th				
				4 < IPI (¹) ≤ 10 ou 0,8 < I _p ≤ 1 ou 1,1 W _{OPN} ≤ W _n < 1,3 W _{OPN}	B ₆ h		
		10 < IPI ≤ 25 ou 1 < I _p ≤ 1,2 ou 0,9 W _{OPN} ≤ W _n < 1,1 W _{OPN}	B ₆ m				
				0,7 W _{OPN} ≤ W _n < 0,9 W _{OPN} ou 1,2 < I _p ≤ 1,3 W _n < 0,7 W _{OPN} ou I _p > 1,3	B ₆ s		
B ₆ ts							

(¹) Paramètres dont le choix est à privilégier

Tableau I.14: Classification GTR des sols comportant des fines et des gros éléments

Classe **C**

Tableau 3 - **Classification des sols comportant des fines et des gros éléments**

Classement selon la nature				Classement selon l'état hydrique et le comportement																																				
Paramètres de nature Premier niveau de classification	Classe	Paramètres de nature Deuxième niveau de classification	Sous classe fonction de la nature																																					
<p>$D_{max} > 50$ mm et tamisat à $80 \mu m > 12\%$</p> <p>ou</p> <p>si le tamisat à $80 \mu m \leq 12\%$ la VBS est $> 0,1$</p>	<p>C</p> <p>Sols comportant des fines et des gros éléments</p>	<p>Matériaux anguleux comportant une fraction $0/50 \text{ mm} > 60 \text{ à } 80\%$ et matériaux roulés. La fraction $0/50$ est un sol de classe A</p>	<p>C_{1A_i}</p> <p>Argiles à silex, éboulis, moraines, alluvions grossières...</p>	<p>Le sous-classement, en fonction de l'état hydrique et du comportement des sols de cette classe, s'établit en considérant celui de leur fraction $0/50 \text{ mm}$ qui peut être un sol de la classe A ou de la classe B</p> <p>* 1^{er} exemple : un sol désigné C_{1A₂h} est un sol qui est :</p> <ul style="list-style-type: none"> ● soit entièrement roulé, ● soit entièrement ou partiellement anguleux; sa fraction $0/50$ représente plus de 60 à 80% de la totalité du matériau. <p>Dans les deux cas, sa fraction $0/50 \text{ mm}$ appartient à la classe A₂ avec un état hydrique h.</p> <p>* 2^{ème} exemple : un sol désigné C_{1B₄₂m} est un sol qui est :</p> <ul style="list-style-type: none"> ● entièrement ou partiellement anguleux; sa fraction $0/50 \text{ mm}$ représente moins de 60 à 80% de la totalité du matériau. <p>La fraction $0/50 \text{ mm}$ est un sol de la classe B₄₂ se trouvant dans un état hydrique m. Les différents sous-classes composant la classe C sont :</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td>C_{1A₁}</td> <td>C_{1A₃}</td> <td>C_{2A₁}</td> <td>C_{2A₃}</td> <td rowspan="2">Etat th, h, m, s ou ts</td> </tr> <tr> <td>C_{1A₂}</td> <td>C_{1A₄}</td> <td>C_{2A₂}</td> <td>C_{2A₄}</td> </tr> <tr> <td>C_{1B₁₁}</td> <td>C_{1B₃₁}</td> <td>C_{2B₁₁}</td> <td>C_{2B₃₁}</td> <td rowspan="2">Matériaux généralement insensibles à l'état hydrique</td> </tr> <tr> <td>C_{1B₁₂}</td> <td>C_{1B₃₂}</td> <td>C_{2B₁₂}</td> <td>C_{2B₃₂}</td> </tr> <tr> <td>C_{1B₂₁}</td> <td>C_{1B₅₁}</td> <td>C_{2B₂₁}</td> <td>C_{2B₅₁}</td> <td rowspan="4">Etat th, h, m, s ou ts</td> </tr> <tr> <td>C_{1B₂₂}</td> <td>C_{1B₅₂}</td> <td>C_{2B₂₂}</td> <td>C_{2B₅₂}</td> </tr> <tr> <td>C_{1B₄₁}</td> <td>C_{1B₆}</td> <td>C_{2B₄₁}</td> <td>C_{2B₆}</td> </tr> <tr> <td>C_{1B₄₂}</td> <td></td> <td>C_{2B₄₂}</td> <td></td> </tr> </table>		C _{1A₁}	C _{1A₃}	C _{2A₁}	C _{2A₃}	Etat th, h, m, s ou ts	C _{1A₂}	C _{1A₄}	C _{2A₂}	C _{2A₄}	C _{1B₁₁}	C _{1B₃₁}	C _{2B₁₁}	C _{2B₃₁}	Matériaux généralement insensibles à l'état hydrique	C _{1B₁₂}	C _{1B₃₂}	C _{2B₁₂}	C _{2B₃₂}	C _{1B₂₁}	C _{1B₅₁}	C _{2B₂₁}	C _{2B₅₁}	Etat th, h, m, s ou ts	C _{1B₂₂}	C _{1B₅₂}	C _{2B₂₂}	C _{2B₅₂}	C _{1B₄₁}	C _{1B₆}	C _{2B₄₁}	C _{2B₆}	C _{1B₄₂}		C _{2B₄₂}	
		C _{1A₁}	C _{1A₃}			C _{2A₁}	C _{2A₃}	Etat th, h, m, s ou ts																																
		C _{1A₂}	C _{1A₄}			C _{2A₂}	C _{2A₄}																																	
		C _{1B₁₁}	C _{1B₃₁}			C _{2B₁₁}	C _{2B₃₁}	Matériaux généralement insensibles à l'état hydrique																																
C _{1B₁₂}	C _{1B₃₂}	C _{2B₁₂}	C _{2B₃₂}																																					
C _{1B₂₁}	C _{1B₅₁}	C _{2B₂₁}	C _{2B₅₁}	Etat th, h, m, s ou ts																																				
C _{1B₂₂}	C _{1B₅₂}	C _{2B₂₂}	C _{2B₅₂}																																					
C _{1B₄₁}	C _{1B₆}	C _{2B₄₁}	C _{2B₆}																																					
C _{1B₄₂}		C _{2B₄₂}																																						
Matériaux anguleux comportant une fraction $0/50 \text{ mm} > 60 \text{ à } 80\%$ et matériaux roulés. La fraction $0/50$ est un sol de classe B	C_{1B_i}	Argiles à silex, argiles à meulière, éboulis, moraines, alluvions grossières...																																						
Matériaux anguleux comportant une fraction $0/50 \text{ mm} \leq 60 \text{ à } 80\%$. La fraction $0/50$ est un sol de classe A	C_{2A_i}	Argiles à silex, argiles à meulière, éboulis, biefs à silex...																																						
Matériaux anguleux comportant une fraction $0/50 \text{ mm} \leq 60 \text{ à } 80\%$. La fraction $0/50$ est un sol de classe B	C_{2B_i}	Argiles à silex, argiles à meulière, éboulis, biefs à silex...																																						

Tableau I.15: Classification **GTR** des sols comportant insensibles à l'eau

Classe **D**

Tableau 4 - **Classification des sols insensibles à l'eau**

Classement selon la nature				Classement selon l'état hydrique		
Paramètres de nature Premier niveau de classification	Classe	Paramètres de nature Deuxième niveau de classification	Sous classe fonction de la nature	Valeurs seuils retenues	Sous classe	
<p>VBS $\leq 0,1$ et tamisat à $80 \mu m \leq 12\%$</p>	<p>D</p> <p>Sols insensibles à l'eau</p>	<p>$D_{max} \leq 50$ mm et tamisat à $2 \text{ mm} > 70\%$</p>	<p>D₁</p> <p>Sables alluvionnaires propres, sables de dune...</p>	<p>Matériaux insensibles à l'eau; mais leur emploi en couche de forme nécessite la mesure de leur résistance mécanique (Los Angelès - LA - et/ou Micro Deval en présence d'eau - MDE -) ou Friabilité des sables (FS).</p>	FS ≤ 60	D ₁₁
		<p>$D_{max} \leq 50$ mm et tamisat à $2 \text{ mm} \leq 70\%$</p>	<p>D₂</p> <p>Graves alluvionnaires propres, sables...</p>		FS > 60	D ₁₂
					LA ≤ 45 et MDE ≤ 45	D ₂₁
					LA > 45 et MDE > 45	D ₂₂
					LA ≤ 45 et MDE ≤ 45	D ₃₁
		<p>$D_{max} > 50$ mm</p>	<p>D₃</p> <p>Graves alluvionnaires grossières propres, dépôts glaciaires,...</p>		LA > 45 et MDE > 45	D ₃₂

I.11. Bois :

I.11.1. Définition : [11]

Le **bois** est une matière première naturelle servant à de multiples usages dans la construction et la maison. Le **bois** est aussi utilisé pour fabriquer du papier, des pièces de charpente, des meubles ou des objets ou comme combustible.

I.11.2. Quelques caractéristiques chimiques et physiques du bois : [12]

Chimiquement, le bois se compose presque toujours de 50% de carbone, 42% d'oxygène, 6% d'hydrogène, 1% d'azote et 1% d'éléments divers.

Parmi ces principaux constituants organiques, nous pouvons citer la cellulose (environ 50%) et la lignine (environ 20%).

Le bois est un matériau anisotrope : ses propriétés varient selon la direction considérée (parallèle au fil du bois, perpendiculaire,...).

Le bois est une matière organique.

I.11.3. Les différents types de bois : [13]

Les familles d'arbres dites essences, productrices de bois se classent en deux grands groupes :

- Les gymnospermes (résineux)
- Les angiospermes (feuillues)

Les feuillues forment la large bande des forêts tropicales alors que les résineux exigent en général des climats assez humides à hivers froids.

Les essences utilisées dans la construction sont :

- Les essences résineuses (80% de l'utilisation), tels que le Sapin, l'Epicéa, le Meuse et le Pin.
- Les essences feuillues (20% de l'utilisation), comme le Chêne et le Hêtre.

Le Pin et le Sapin. Ce sont deux espèces appartenant à une même catégorie de bois, celle des résineux, ils sont largement utilisés dans le monde comme matériaux de construction du fait de leur grande disponibilité et de leurs propriétés mécaniques intéressantes, alliées à une masse volumique peu élevée.

I.11.4. Le Pin :

La dénomination botanique du Pin est "Pinus Sylvestris", c'est une espèce boréale et montagnarde provenant essentiellement d'Europe et d'Asie du nord. Il est d'un aubier blanc à blanc jaunâtre et d'un duramen clair à jaune brun-rouge, sa masse volumique varie de 320 à 800

kg/m³ à 15% d'humidité relative, possédant un retrait moyen de 4% radial et 8% tangentiel, une bonne résistance mécanique (résistance à la compression parallèle aux fibres de 47N/mm² et une résistance à la flexion de 79N/mm²).

Le Pin est utilisé pour un très grand nombre d'applications mais on notera surtout celles liées à la construction d'habitations tel que, charpentes et ossatures en bois, murs et plafonds, lambris, parquets, etc.

I.11.5. Quelques caractéristiques physiques et mécaniques du bois : [14]

Tableau I.16: caractéristiques physiques et mécaniques de quelques bois

Essence	Densité	Retrait radial total (%)	Retrait tangentiel total (%)	Dureté Monnin	Rupture en flexion (MPa)	Module d'Young (MPa)
Pin d'Alep (PACA)	0,55 (0,53 - 0,58) bois léger	4,1 (3,7 - 4,7) moyen	7,3 (7 - 8,1) moyen	2,8 (2,4 - 3,1) tendre	82 (63 - 98) moyen	11200 (8300 - 13500) faible
Pin maritime	0,51 (bois léger)	4,5 (moyen)	9 (moyen)	2,3 (tendre)	80 (moyen)	8800 (faible)
Pin sylvestre	0,53 (bois léger)	5,1 (moyen)	9 (moyen)	3 (tendre à mi-dur)	90 (moyen)	11900 (faible)
Douglas	0,54 (bois léger)	5,1 (moyen)	8,1 (moyen)	2,2 (tendre)	85 (moyen)	12100 (faible)
Sapin	0,45 (bois très léger)	4,2 (moyen)	9,3 (moyen)	1,5 (très tendre à tendre)	68 (faible)	12200 (faible)
Epicéa	0,45 (bois très léger)	5,1 (moyen)	9,3 (moyen)	1,4 (très tendre)	71 (faible)	11000 (faible)

Note: 1 MPa = 10, 2 kg/cm² / Les données relatives au pin sylvestre, pin maritime, Douglas, Sapin et Epicéa sont issues du « Guide des essences de bois » (Benoit Y. 1997)

I.11.6. Les résidus de bois : [15]

a). Les déchets de bois se subdivisent en 4 catégories:

1) le bois à l'état naturel : soit les déchets de coupe de bois issus de l'économie forestière ou des scieries

2) les résidus de bois (avant tout traitement) :

provenant d'entreprises de transformation du bois (ateliers de menuiserie ou de charpenterie), ou

les restes de bois non traités de chantier tels que plateaux de coffrage, d'échafaudage, bois équarri ou étais

3) le bois usagé, issu de la démolition, transformation ou rénovation de bâtiments, de meubles sans revêtements, d'emballages en bois et de mélanges de tels bois avec les types précités

4) le bois à problèmes, soit essentiellement :

le bois imprégné ou traité avec des produits de conservation du bois (PCP ou similaire), ex: traverses de chemin de fer et poteaux téléphoniques, silos et constructions immergées, tuteurs et piquets de vigne, meubles de jardin, clôtures et parois antibruit, palissades et palplanches, ponts en bois, etc.

le bois recouvert de PVC ou autres matériaux synthétiques
les mélanges de ce type de bois avec d'autres.

b). Que contient le bois usagé ?

Les analyses de déchets de bois divers et variés montrent qu'en comparaison avec le bois naturel, ces bois présentent des teneurs sensiblement plus élevées en métaux lourds, dont en particulier le plomb et le zinc (voir tableau I.16).

Tableau I.17: Concentrations de métaux lourds dans 2 types de bois [15]

mg/kg matière sèche	Plomb	Chrome	Zinc
Bois à l'état naturel	0-5	0-2	4-30
Bois usagé issu de la démolition, de la transformation de bâtiments, provenant de meubles, d'emballages, etc.	40-700	10-90	150-1000

Chapitre II

II.1. Introduction :

Nous allons présenter dans ce chapitre, quelques caractéristiques mécaniques et physiques de deux types de sols (pulvérulent et Cohérent), les essais de caractérisation des sols avec un résidu de bois.

Le but principal de cette partie expérimentale, est l'étude de l'influence de la présence ou de l'ajout d'un résidu de bois sur les caractéristiques et le comportement de deux types de sols : le premier est le sable et le deuxième c'est l'argile. Des mesures ont été faites sur la masse volumique, la limite d'Atterberg, l'analyse granulométrique, la teneur en eau et cisaillement, afin de classer les deux sols utilisés d'une part, et d'identifier l'influence du résidu de bois.

Le choix des matériaux s'est porté, tout d'abord, sur leurs disponibilités au niveau du laboratoire LTP Est de Constantine.

Les sols utilisés sont :

- Le sable d'Oued de Biskra.
- L'argile d'Oued Boumerzoug à Constantine.

II.2.Sable :

2-1.Equivalent de sable :

a)- Introduction :

C'est un essai empirique simple, rapide ne nécessitant qu'un appareillage très élémentaire.

Il permet de contrôler sur place la constance de certaines qualités de matériaux mis en œuvre sur chantier à une cadence rapide. Il est très largement utilisé, en particulier en géotechnique routière. [3]

b)- But :

L'essai d'équivalent de sable, désigné par le symbole E .S., a pour but d'évaluer a proportion relative d'éléments fins contenus dans le sol et dont la présence en quantité notable peut modifier le comportement mécanique. [3]

c)- Principe :

L'essai consiste à opérer sur l'échantillon de sol (fraction du matériau dont les éléments sont inférieurs à 5 mm) un lavage énergétique de manière à se séparer de ses matières fines.

L'éprouvette contenant le sol et la solution lavant est soumise à 90 cycles de 20 cm d'amplitude en 30 secondes. La solution utilisée a, en outre, un pouvoir flocculant sur les argiles et les colloïdes. [3]

d)-Matériel :

- 03 Eprouvettes cylindriques transparentes en matière plastique, chacune est graduée en deux traits repères; 10cm à partir de la base jusqu'à 38 cm.
- Un bouchon en caoutchouc permettant de fermer l'éprouvette.
- Un piston taré en métal inoxydable constitué :
 - ❖ D'une tige.
 - ❖ D'une embase dont la face inférieure est plate, et comporte latéralement
 - ❖ 3 vis de centrage qui centrent le piston dans l'éprouvette et qui permet de guider la tige du piston.
 - ❖ Un poids fixé à l'extrémité supérieure de la tige pour donner à l'ensemble du piston taré, hormis le manchon, un poids total de 1000g.
- Un entonnoir pour transvaser l'échantillon dans l'éprouvette.
- Une bonbonne de 5 litre et son bouchon contenant la solution normalisée, avec siphon et tube souple de 1.5m.
- Un tube laveur, prolongeant le tube souple; métallique.
- Machine agitatrice, électrique ou manuelle.
- Règle de mesure.

e)- Mode opératoire :

- Remplir l'éprouvette jusqu'au premier trait (10 cm) avec la solution lavante.
- Verser la quantité de sable sec pesé (110g à 120g), à l'aide de l'entonnoir, dans l'éprouvette placé verticalement.
- Taper à plusieurs reprises la base de l'éprouvette fortement sur la paume de la main pour déloger les bulles d'air et favoriser un bon mouillage de l'échantillon puis le laisser reposer 10mn.
- Boucher l'éprouvette à l'aide du bouchon de caoutchouc.
- Agiter l'éprouvette horizontalement, (90 fois allers-retours en 30s).

- Placer l'éprouvette verticalement, ôter le bouchon et le rincer au-dessus de l'éprouvette avec la solution lavant, réglée à faible débit.
- En descendant le tube laveur dans l'éprouvette, rincer les parois, puis enfoncer le tube jusqu'au fond pour laver le sable et faire remonter les particules argileuses, l'éprouvette étant toujours dans la position verticale ; pour cela, imprimer un mouvement doux de piquage et rouler le tube laveur entre le pouce et l'index tout en faisant tourner lentement l'éprouvette avec l'autre main.
- Laisser reposer 20mn.
- Mesurer la hauteur de sable propre seulement (h_2) et la hauteur du sable propre y compris le flocculat (éléments fins) (h_1).
- Mesurer la hauteur du sable plus précisément avec le piston taré (h'_2).
- L'équivalent de sable visuel est: **ESV= (h_2/ h_1) x100%.**
- L'équivalent de sable au piston est: **ESP= (h'_2/ h_1) x100%.**

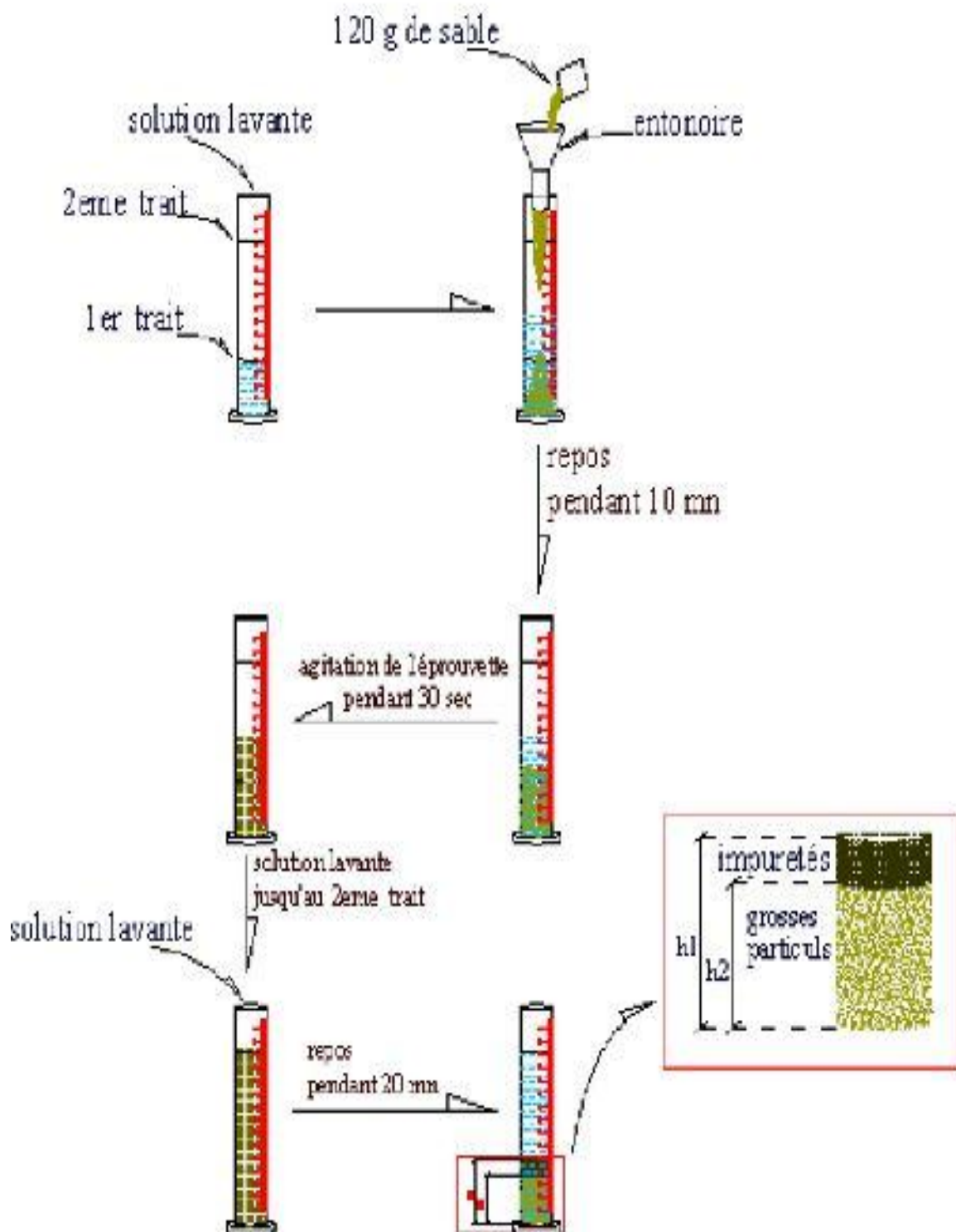


Figure II.1 Schéma de l'essai de l'équivalent de sable.

f)-Classification :

Il est recommandé les valeurs suivantes : (en générale).

- ❖ Couches de chaussée :
 - Couche drainante : $ES > 40$
 - Couche de fondation : $ES > 20$
 - Couche de base : $ES > 30$.

Tableau II.1 Tableau de Classification des sols selon E.S

Nature	Equivalent de sable
Sable pur et propre	E. S. = 100
Sol non plastique	E. S. = 40
Sol plastique	E. S. = 20
Argile pure	E. S. = 0

g)- Résultat :

Tableau II.2 les Résultats de l'essai d'ES

Essai	$M_T(g)$	H1 (mm)	H2 (mm)	ES (%)	ES_{moy} (%)
Essai 1	285.3	229	70	30.56	29.92
Essai 2	285.3	239	70	29.28	

Remarque :

D'après le tableau II.2 et suivant la classification ci-dessus, on peut dire que notre sable est peu plastique recommandé pour les couche de fondation.

2.2. Analyse granulométrique :

a)- But de l'essai :

L'analyse granulométrique permet de déterminer la grosseur et les pourcentages pondéraux respectifs des différentes familles de grains constituant l'échantillon. Elle s'applique à tous les granulats de dimension nominale inférieure ou égale à 63mm, à l'exclusion des fillers.

A noter qu'il faut éviter la confusion entre la granulométrie qui s'intéresse à la détermination de la dimension des grains et la granularité qui concerne la distribution dimensionnelle des grains d'un granulats.

b)- Principe de l'essai :

L'essai consiste à classer les différents grains constituant l'échantillon en utilisant une série de tamis, emboîtés les uns sur les autres, dont les dimensions des ouvertures sont décroissantes du haut vers le bas. Le matériau étudié est placé en partie supérieure des tamis et le classement des grains s'obtient par vibration de la colonne de tamis.

c)- définitions :

Pour les besoins du présent document, les définitions suivantes s'appliquent :

Prise d'essai : matériau soumis à l'essai.

Analyse granulométrique par tamisage : ensemble des opérations aboutissant à la séparation selon leur grosseur des éléments constituant l'échantillon, en employant des tamis à maille carrée afin d'obtenir une représentation de la répartition de la masse des particules à l'état sec en fonction de leur dimension.

Dimension nominale d'ouverture d'un tamis d : dimension caractéristique de la maille carrée de côté d .

Refus sur un tamis : partie du matériau retenu sur un tamis.

Tamisât ou passant : partie du matériau passant à travers les mailles d'un tamis.

Classe granulométrique : ensemble des éléments dont les dimensions sont comprises entre deux ouvertures d de tamis définissant un intervalle.

Pourcentage massique de refus : rapport, exprimé en pourcentage, de la masse de matériau sec retenu par un tamis d'ouverture d , à la masse totale initiale de matériau sec passant à travers le tamis de maille.

Pourcentage massique d'un tamisât : rapport, exprimé en pourcentage, de la masse sèche du passant à travers un tamis d'ouverture d , à la masse totale initiale de matériau sec passant à travers le tamis de maille.

Le pourcentage massique de tamisât est désigné par : $100 - r$.

Courbe granulométrique : représentation du pourcentage massique p des différents tamisât en fonction de la dimension nominale d'ouverture des tamis.

Dimension nominale d'ouverture à N pour cent (d_N) : dimension interpolée sur la courbe granulométrique pour laquelle le pourcentage massique p de tamisât est égal à N pour cent.

Facteur d'uniformité : sur le passant au tamis de 63mm, rapport des dimensions des mailles de tamis pour lesquels il y a respectivement 60% et 10% de passant :

$$C_u = d_{60} / d_{10}$$

Facteur de courbure : sur le passant au tamis de 63mm, rapport des dimensions des mailles de tamis défini par :

$$C_c = d_{30}^2 / d_{10} \cdot d_{60} \\ = C_u (d_{60} / d_{10})^2$$

d)- Equipement nécessaire:

Ce sont des tamis (fig.1) qui sont constitués d'un maillage métallique définissant des trous carrés de dimensions normalisées. Les passoire, qui comportent des trous ronds percés dans une tôle, ne sont plus utilisées actuellement. Pour un travail aisé et aux résultats reproductibles, il est conseillé d'utiliser une machine à tamiser électrique qui imprime un mouvement vibratoire à la colonne de tamis.

La dimension nominale des tamis est donnée par l'ouverture de la maille, c'est-à-dire par la grandeur de l'ouverture carrée. Ces dimensions sont telles qu'elles se suivent dans une progression géométrique de raison $\sqrt{10}$, depuis le tamis 0.08mm jusqu'au tamis 80mm. Pour des ouvertures inférieures à 0.08mm, l'analyse granulométrique n'est pas adaptée et l'on procède par sédimenteriez.

L'existence antérieure de passoire (trous ronds) a conduit à une double classification des tamis et des passoire, tout en conservant pour chaque famille d'appareil la même progression géométrique des ouvertures. Afin d'éviter toute ambiguïté, un tamis et une passoire équivalents ont été désignés par un même numéro de module. Les dimensions nominales normalisées des tamis, seul appareils actuellement, sont les suivantes :

Tableau II.3 échelles des tamis

Modules	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Tamis	0.08	0.10	0.12	0.16	0.20	0.25	0.315	0.400	0.50	0.63	0.80
Modules	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41
Tamis	1.00	1.25	1.60	2.00	2.50	3.15	4.00	5.00	6.3	8	10
Modules	42	43	44	45	46	47	48	49	50		
Tamis	12.5	16	20	25	31.5	40	50	63	80		

e)- Description de l'essai :

Le matériau séché, de masse M, est versé sur une série de tamis choisis de telle manière que la progression des ouvertures soit croissante du bas de la colonne vers haut. En partie inférieur, on dispose un tamis de 0.08mm sur montant un fond étanche afin de récupérer les éléments fins qui passant à travers cette tamis.

On considère que le tamisage est terminé lorsque les refus ne varient pas de plus de 1% entre deux séquences de variations de la tamiseuse.

Le refus du tamis ayant la plus grande maille est pesé. Soit R_1 la masse de ce refus.

Le refus du tamis immédiatement inférieur est pesé. Soit R_2 la masse du refus deuxième refus.

La somme R_1+R_2 représente le refus cumulé sur le deuxième tamis.

Cette opération est poursuivie pour tous les tamis pris dans l'ordre des ouvertures décroissantes. Ceci permet de connaître la masse des refus cumulés R_n aux différents niveaux de la colonne de tamis. Le tamisât présent sur le fond de la colonne de tamis est également pesé. Soit P sa masse.

La somme de refus cumules mesurés sur les différents tamis et du tamisât sur le fond (fillers) doit coïncider avec le poids de l'échantillon introduit en tête de colonne. La perte éventuelle de matériaux pendant l'opération de tamisage ne doit pas excéder plus de 2µm du poids total de l'échantillon de départ

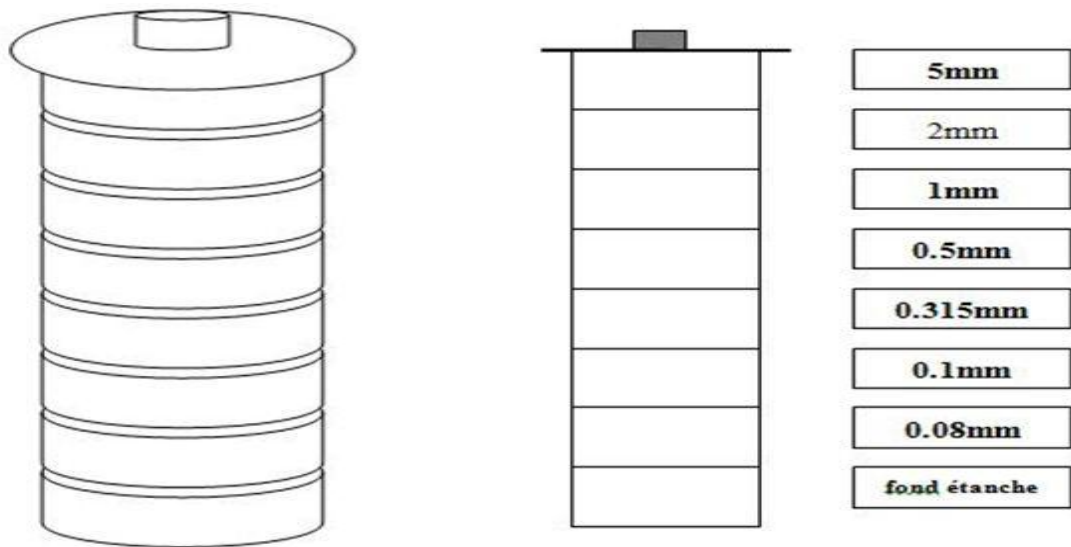


Figure II.2 placement des tamis par ordre

f)- Résultat de l'essai :

Après l'échantillonnage la masse de l'échantillon est $M = 1\text{kg}$

Le résultat de l'analyse granulométrique est représenté sur le tableau suivant :

Tableau II.4 résultat d'essai de granulométrie

Tamis (mm)	Refus (g)	Refus cumulés (g)	Refus cumulés (%)	Tamisat cumulés (%)
5	000.0	000.0	00.00	100
2.5	161.0	161.0	16.10	83.90
1.25	136.0	297.0	29.70	70.30
0.63	177.0	474.0	47.40	52.60
0.315	304.0	778.0	77.80	22.20
0.16	152.0	930.0	93.00	07.00
0.08	054.0	984.0	98.40	01.60
fond	007.5	991.5	99.15	00.85

On a :

$$S = R_n + P = 991.5 + 7,5 = 999\text{g}$$

$$\text{La perte} = ((M - S) / M) \cdot 100 = ((1000 - 999) / 1000) \cdot 100 = 0.1\% < 2\%$$

Alors le résultat de tamisage est acceptable.

g)- L'analyse de résultat :

Traçage de la courbe granulométrique.

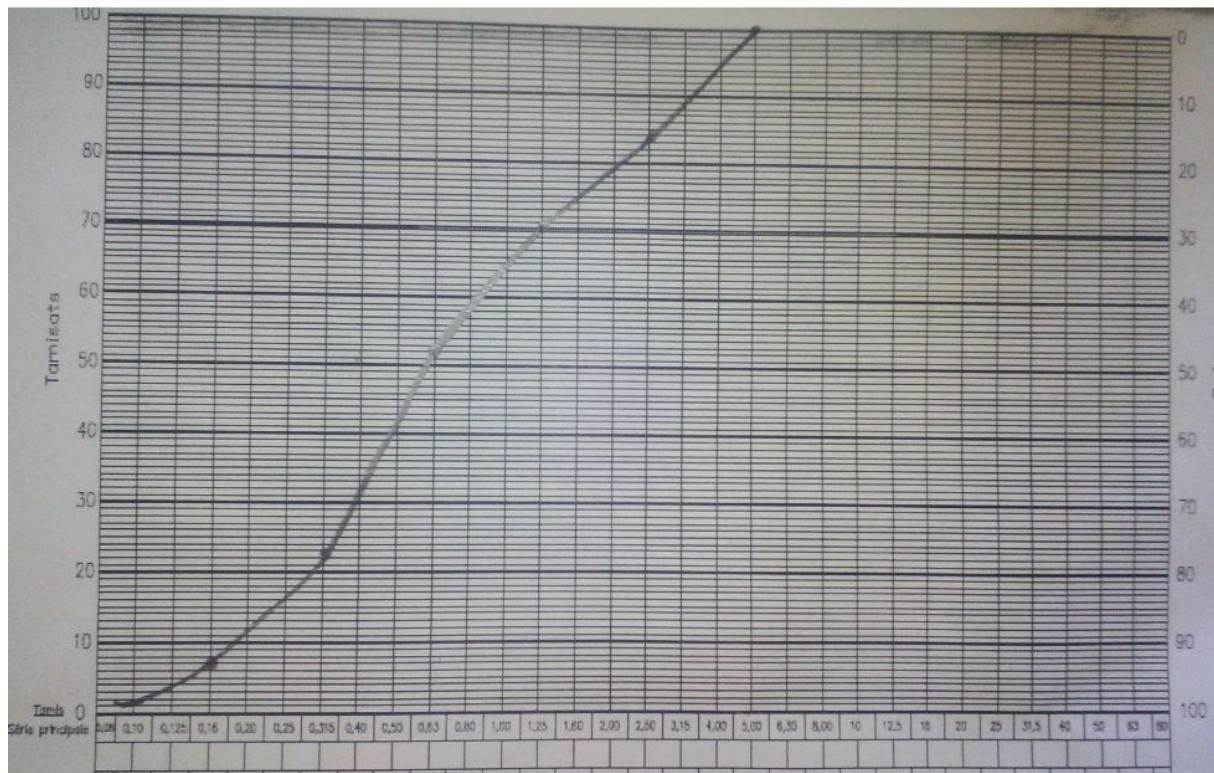


Figure II.3 la courbe granulométrique du Sable

Le tamisât sur le tamis 80 μ = 0.85% < 50% il s'agit d'un sol grenu.

Le tamisât sur le tamis 2mm = 80%

Le pourcentage des éléments compris entre 80 μ et de 2mm est de
 $80 - 0.85 = 79.15\% > 50\%$ il s'agit d'un sol sable

De la courbe on a : $D_{10} = 2$

$$D_{30} = 22$$

$$D_{60} = 51$$

On à :

Le tamisât sur le tamis 80 μ = 0.85% < 2% seul symbole

$$C_u = d_{60} / d_{10} = 25.5 \rightarrow C_u > 6$$

$$C_c = d_{30}^2 / d_{10} \cdot d_{60}$$

$$= C_u (d_{60} / d_{10})^2 = 4.74$$

$$\rightarrow C_c < 1 \text{ et } C_c > 3$$

Alors on trouve que le sol est : sable étalée mal gradué

II.2.3 Cisaillement :

a)- But :

Il s'agit de déterminer les caractéristiques mécaniques d'un sol en procédant au cisaillement rectiligne d'un échantillon sous charge constante. L'essai de cisaillement permet de tracer la courbe intrinsèque du sol étudié, et de déterminer son angle de frottement interne ϕ et sa cohésion c . Ces valeurs servent entre autre à déterminer la contrainte admissible par le sol dans le cas de fondations superficielles et la poussée du sol sur un mur de soutènement.

b)- Matériel :

L'échantillon de sol à étudier est placé entre deux demi-boîtes qui peuvent se déplacer horizontalement l'une par rapport à l'autre. Voir figure ci-dessous. Un piston permet d'exercer sur le sol une contrainte normale σ déterminée.

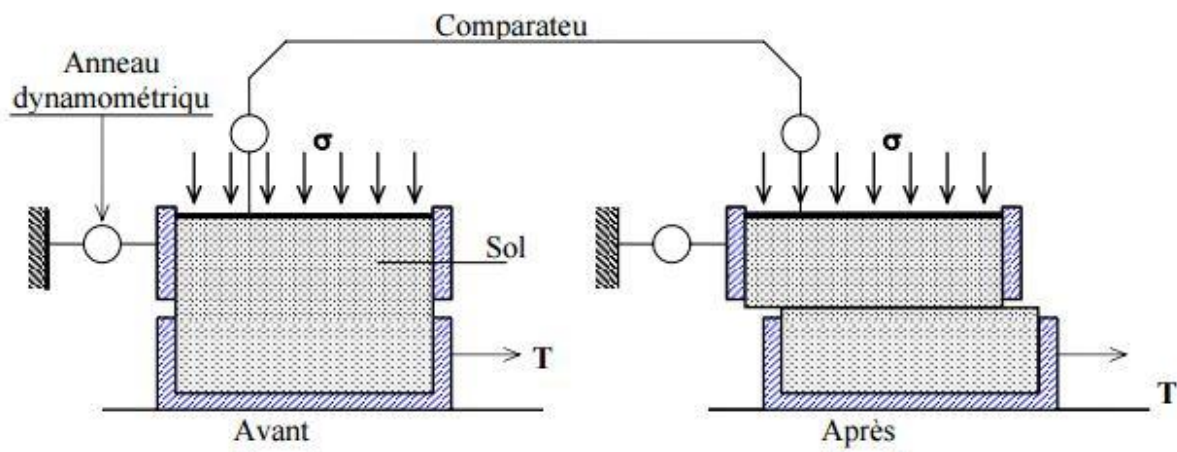


Figure II.4 Boîte de Cisaillement

La demi-botte inférieure est entraînée horizontalement à vitesse constante. La force totale de cisaillement F est mesurée à l'aide d'un anneau dynamométrique fixé à la demi-botte supérieure. Un comparateur mesure la déformation verticale de l'échantillon. L'échantillon subit donc un cisaillement direct et rectiligne suivant un plan imposé sur lequel on exerce une contrainte normale déterminée.



Figure II.5 Une Boite de Cisaillement Carré



Figure II.6 Les Boites de cisaillement a saturation (UU)

c)-Mode Opérateur :

Préparation de l'éprouvette et des plaques drainantes :

- Saturer les plaques drainantes et les recouvrir d'un papier filtre
- Tailler l'éprouvette de telle sorte que les dimensions de sa section droite soient ajustées à celle de la boîte.
- Peser l'échantillon et mesurer sa hauteur puis placer une plaque drainante dans le fond de la demi-botte inférieure.
- Introduire l'éprouvette dans la boîte de telle sorte que le plan de glissement la partage en deux parties sensiblement égales.
- Caler l'éprouvette dans la boîte de cisaillement d'eau déminéralisée.
- Remplir le châssis contenant la boîte de cisaillement d'eau déminéralisée.
- Mesurer le déplacement vertical du piston en fonction du temps pendant 1h au moins et jusqu'à stabilisation.
- Déterminer, à l'issue de la phase de consolidation ; la vitesse maximale de cisaillement pas $V_{max}=125/t_{100}$ Avec ($V_{max} = 25 \mu\text{m}/\text{min}$)

d)- Réalisation de L'essai

Cisailler au moins trois éprouvettes de même dimensions et sous trois efforts verticaux différents selon la nature du sol ou exigence client.

- Placer la boîte de cisaillement dans le châssis étanche fixé sur le bâti ainsi que le piston muni de sa plaque drainante sur le sommet de l'éprouvette
- Noter après fixation du system de mesure de l'effort T et avant application de tout effort, la valeur d'origine du capteur de l'effort T et régler, par suite, la position du capteur de mesure du déplacement horizontal et noter sa valeur d'origine
- Positionner le capteur de mesure du déplacement vertical du piston et noter sa valeur d'origine
- Appliquer l'effort N sur la partie supérieure du piston et mesurer le déplacement vertical du piston en fonction du temps
- Arrêter le cisaillement soit lorsque la variation de l'effort T pour un intervalle de mesure correspondant à un déplacement : Horizontale = 0.5mm est à 0.01 de l'effort maximal, soit lorsque atteint au moins 5mm
- peser l'éprouvette, déterminer sa teneur en eau final selon la NF P 94-050.

e)- Vitesse d'essai :

- Sols pulvérulents : 1,5 mm / min
- Sols cohérents :
 - essais non drainés, consolidés ou non (UU ou CU): 1,5 mm / min
 - essai drainé (CD) : vitesse la plus lente

f)- Lectures :

Lire, à intervalles réguliers les indications du comparateur de l'anneau, du comparateur de déplacement horizontal et du comparateur vertical. Arrêter l'essai lorsque la contrainte de cisaillement est devenue constante ou lorsqu'on a une déformation horizontale de 5mm

g)- Résultats :

Tableau II.5 Les Résultats De L'essai de Cisaillement

	L'angle de frottement (°)	La cohésion (Kpa)
Sol pulvérulent (sable)	27	0,5

Tableau II.6 Résultats d'essai de Cisaillement avec résidu de bois

Bois (%)	0	5	10
L'angle de frottement (°)	27	23	21
La cohésion (Kpa)	0.5	42.5	66.3

Remarque :

D'après les résultats illustrés dans le tableau II.3 on peut dire que :

- La cohésion est presque nulle c.-à-d. la quantité d'eau est très importante et les particules du sol sont séparées les unes des autres.
- L'angle de frottement est moyen ce qui signifie que notre sable a des grains anguleux.

II.3.Argile :

II.3.1 Analyse granulométrique :

L'essai d'analyse granulométrique effectuer pour l'argile est le même que celui effectuer pour le sable (même mode opératoire et même matériels).

a)-Résultat :

Tableau II.7 Les résultat d'essai de granulométrie (argile)

Ouverture des tamis en (mm)	Masse des refus partiels	Masse des refus cumulés	Pourcentage des refus cumulés en	Tamisâtes cumulés en
	Ri(g)	Rn(g)	(Rn /M1)	100-(Rn/M1)
11.2	40	40	8	92
8.000	50	90	18	82
5.600	30	120	24	76
4.000	30	150	30	70
2.800	30	180	36	64
2.000	30	210	42	58
1.400	35	245	49	51
1.000	40	285	57	43
0.710	40	325	65	35
0.500	45	370	74	26
0.355	50	420	84	16
0.250	40	460	92	8
0.180	15	475	95	5
0.125	10	485	97	3
0.090	5	490	98	2

0.063	5	495	99	1
Passant 0.063	5	500	100	0

II.3.2 la teneur en eau :

a)-But de l'essai :

Les granulats utilisés pour la confection du béton contiennent généralement une certaine quantité d'eau variable selon les conditions météorologiques. L'eau de gâchage réellement utilisée est par conséquent égale à la quantité d'eau théorique moins l'eau contenue dans les granulats. Il faut par conséquent disposer de moyens pour mesurer combien il y a d'eau dans les granulats. Il y'a deux possibilités pour mesurer la teneur en eau :

1. Sécher le matériau humide complètement,
2. Faire entrer l'eau absorbée dans une réaction chimique.

b)-Définition :

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

c)-Principe :

Trois procédés peuvent être utilisés pour la mesure de la teneur en eau in situ et/ou au laboratoire. 1., Flambage à l'alcool à brûler.

C'est le procédé couramment désigné sous le nom de "la poêle à frire".

- Peser l'échantillon humide, soit M_h ,
- Le placer dans un récipient métallique plat, et l'arroser d'alcool à brûler (1/2 l pour 2kg de sable),
- Allumer et agiter avec une tige métallique. Quand l'alcool est éteint, laisser refroidir,
- Répéter l'opération jusqu'à ce que le matériau soit sec, le peser soit M_s . Déterminer la W.

d)-Résultats

$W=11,3\%$

II.3.3.Limite d'atterberg :

a)-but :

Les limites d'atterberg sont des paramètres géotechnique destiné à identifier un sol et a caractérisé sont état au moyen de son indice de constance.

b)- principe :

Le classement d'un sol vis à vis de la classification du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées(L.P.C.P) se fait à partir de deux essais de laboratoire qui sont l'analyse granulométrique et la détermination des limites d'Atterberg. La manipulation consiste à exploiter les résultats de l'analyse granulométrique d'un sol et à définir ses limites d'Atterberg afin de le classer au sens de la classification L.C.P.C.La particularité des sols fins est que, leur consistance varie fortement en fonction de leur teneur en eau .Leur état va du solide s'ils sont desséchés, à l'état liquide s'ils sont détrempés. Entre ces 2 états, il existe un état intermédiaire dit plastique (pâte à modeler).

Les limites d'Atterberg sont des constantes physiques conventionnelles (teneur en eau pondérale) qui marque les seuils entre :

- Le passage d'un sol de l'état liquide à l'état plastique (limite de liquidité WL).
- Le passage d'un sol de l'état plastique à l'état solide (limite de plasticité WP).

Ces deux limites sont utilisées afin de déterminer la classification des sols. Elles s'appliquent sur la fraction de sol passant au travers du tamis de 400 µm

c)-Mode Opérateur :

- Echantillonner le sol et homogénéiser le par brassage
- Imbiber dans un récipient d'eau a la température ambiante, pendant au moins 24h, une masse de matériau gr (a 200D)
- Tamiser par voie humide au tamis de 400µm pour récupérer une masse (a 200g)
- Recueillir l'eau de lavage et la tamisât dans un bac
- Siphonner sans entrainer de particules solides après une décantation d'au moins 12h
- Evaporer l'eau excédentaire a une température ne dépassant pas 50°C



Figure II.7 Boite de Casagrand

d)-Détermination de la limite de liquidité :

- Vérification de l'appareil de Casagrande
- Malaxer la totalité du tamisât afin d'obtenir une pâte homogène et presque fluide
- Répartir avec la spatule, dans la coupelle propre et sèche une masse d'environ 70g de matériau et l'étaler en plusieurs couches
- Partager la pâte en deux au moyen de l'outil à rainuré
- Fixer délicatement la coupelle sur le support métallique de l'appareil de Casagrande
- Actionner la came de façon à soumettre la coupelle à une série de chocs à la cadence de 2 coups/seconde
- Noter le nombre N de chocs nécessaires pour que les lèvres de la rainure se rejoignent sur une longueur d'environ 1 cm
- Ne poursuivre l'essai que si N est compris entre 15 et 35 : si ($N < 15$ ou $N > 35$) refaire l'essai
- Prélever environ 5g de pâte de chaque côté des lèvres de la rainure et au voisinage de l'endroit où elles se sont refermées afin d'en déterminer la teneur en eau

- Placer le prélèvement dans une capsule de masse connue et pesée immédiatement avant d'être introduit dans l'étuve pour dessiccation
- Effectuer au moins 4 fois la même opération complète sur la même pate avec une teneur en eau différente a chaque fois



Figure II.8 L'échantillon après Malaxage

e)- Détermination de la limite de plasticité

- Former une boulette à partir de la pate préparée
- Rouler la boulette sur une plaque lisse a la main ou éventuellement a l'aide d'une plaquette, de façon a Obtenir un rouleau qui aminci progressivement jusqu'à ce qu'il atteigne un diamètre de 3mm et une longueur d'environ 10cm et ne doit être creux
- La limite de plasticité est obtenue lorsque, simultanément, le rouleau se fissure et que son diamètre atteigne 3 mm +/- 0.5mm
- Si aucune fissure n'apparait, le rouleau est réintégré a la boulette et reformer a nouveau
- Prélever, une fois les fissures apparues, la partie centrale du rouleau et la placer dans une capsule de masse connue, la poser immédiatement et l'introduire dans l'étuve, afin de déterminer sa teneur en eau
- Effectuer un deuxième essai sur une nouvelle boulette.



Figure II.9 Limite de Plasticité

f)-Résultat :

Tableau II.8 Résultats D'essai De la limite d'atterberg

	WL (%)	WP (%)	IP (%)	Ic	IL
Sol cohérents (argile)	43,671	21,710	21,961	1,474	-0,474

Tableau II.9 Résultats D'essai De la limite d'atterberg avec résidu de bois

Bois (%)	0	5	10
WL (%)	43.671	44.592	51.859
WP (%)	21.710	22.420	25.555
IP (%)	21.961	22.172	26.304
Ic	1,474	2,011	1,971
IL	-0,474	-1,011	-0,971

g)-Remarque :

- ✓ D'après les résultats du Tableau II.5, on s'appuyant aux données du Tableau I.4, notre type de sol est un Argile.
- ✓ D'après la Figure I.5, notre argile est Inorganique de Plasticité Moyenne.
- ✓ D'après le Tableau I.5 et le Tableau I.6 notre argile à un état de consistance solide très dure.

II.3.4Masse volumique :

a)-Définition :

C'est la masse d'un corps par unité de volume absolu de matière pleine (volume de matière seule, pores à l'intérieur des grains exclus), après passage à l'étuve à 105 °C, notée γ_{ab} ou ρ_{ab} et exprimée en (g/cm^3 , kg/m^3 ou T/m^3).

b)-But :

C'est de permettre de connaître la masse d'une fraction granulaire lorsque par exemple on élabore une composition de béton

c)-Matériel :

- Etuve
- La Balance
- Résistance
- Pycnomètre

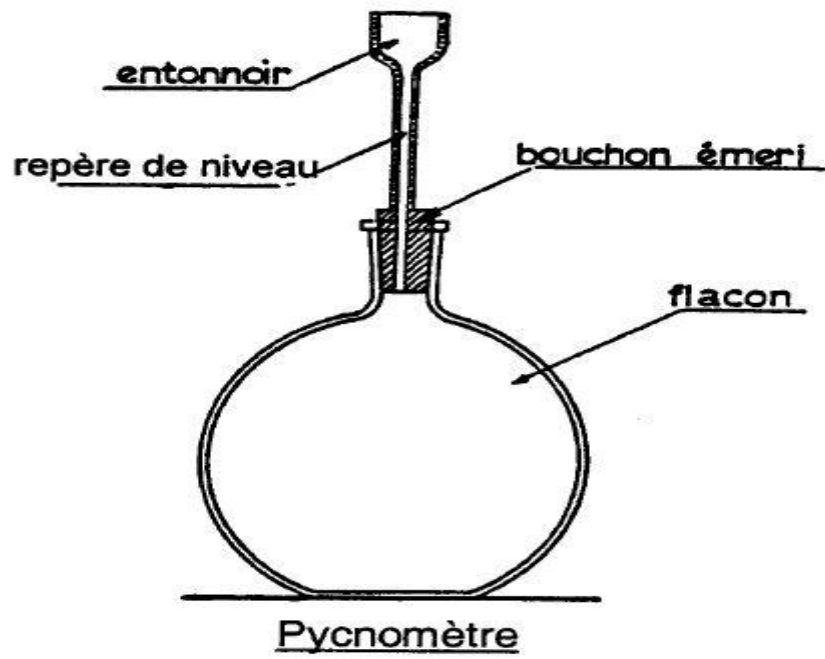


Figure II.10 Pycnomètre



Figure II.11 L'échantillon avant d'ébullition



Figure II.12 l'échantillon Dans le cas d'ébullition

d)-Mode opératoire :

- Déterminer avec précision la masse M_1 du pycnomètre rempli d'eau jusqu'au niveau du trait repaire.
- Déterminer avec précision la masse M_2 d'un échantillon de matériau sec (granulats) environ 50 g.
- Introduire la totalité du matériau dans le pycnomètre, remplir d'eau, fermer le bouchon et amener le niveau de l'eau au niveau du trait repaire. Vérifier que le pycnomètre ne contient aucune bulle d'air. Peser alors le pycnomètre, soit M_3 .

On peut alors écrire la relation entre les différents poids mesurés : $M_3 = M_1 + M_2 - (M_2 / \rho_{ab}) \rho_w$

On en déduit la masse volumique ρ_{ab} du matériau, connaissant la masse volumique de l'eau ρ_w qui est égale à 1 g/cm³.

e)-Résultat :

M1 : la masse du pycnomètre rempli d'eau

M2 : la masse d'un échantillon de matériau sec

M 3 : la masse de pycnomètre du sol et du l'eau

ρ_w : la masse volumique de l'eau conventionnellement = 1

$\rho_s = \rho_w (M_2 - M_1) / (M_2 - M_1 - M_3)$

Tableau II.10 Résultats de l'essai de la masse Volumique

	la masse volumique (KN/m³)
Sol cohérent (argile)	27,2

Remarque : la masse volumique de notre argile est dans la norme.

Chapitre III

II.3.5 Cisaillement :

L'essai de cisaillement effectués pour l'argile est le même que celui effectués pour le sable (même mode opératoire et même matériels), sauf que notre argile a subi avant l'essai un traitement spéciale à cause du gonflement. Ce traitement consiste à l'enlèvement des pierres poreuses.

a)-Résultat :

Tableau II.11 Les résultats de cisaillement sans ajout de bois

	l'angle de frottement °	la cohésion (Kpa)
Sol cohérent	9	40,6

Tableau II.12 Les résultats de cisaillement quand en ajout de bois

Bois(%)	0	5	10
l'angle de frottement	9°	31°	14°
la cohésion (Kpa)	40,6	0,2	49,3

b)-Remarque :

D'après les résultats illustrés dans le tableau II.9 on peut dire que :

- La cohésion est très élevée et l'angle de frottement est faible ce qui confirme les formations de la littérature.

c)-Résidus de Bois :

Les résidus de bois utilisés ont un diamètre inférieur à 2 mm (traitement par passage au tamis de 2 mm de maille)

II.4.Conclusion :

Notre étude expérimentale à exprimer que notre sol pulvérulent (sable) est peu plastique, à granulométrie étalée mal gradué, possède une cohésion presque nulle est un angle de frottement normal. Alors que notre sol cohérent (argile) est une argile inorganique de plasticité moyenne à état de consistance solide très dure et à granulométrie semi étalée. il a marqué une très grande cohésion avec un faible angle de frottement.

III.1. Introduction

Ce chapitre consiste à interpréter les résultats d'une étude expérimentale obtenus au laboratoire LTP Est de Constantine.

A partir des essais d'identifications et de caractérisations pour les deux sols avec un résidu de bois (sol pulvérulent qui est le sable et sol cohérent qui est l'argile), nous tentons par cette étude, en première étape d'interpréter les résultats obtenus pour les différents cas d'essais et en deuxième étape de regrouper ces résultats pour en tirer les conclusions adéquates. On procèdera à des comparaisons relatives sur l'effet des résidus aux deux types de sols.

III.2.La masse volumique :

Tableau III.1 Résultats de la masse Volumique avec résidu de bois (Argile)

Bois (%)	0	5	10
la masse volumique (KN/m ²)	27.2	26.4	25.3

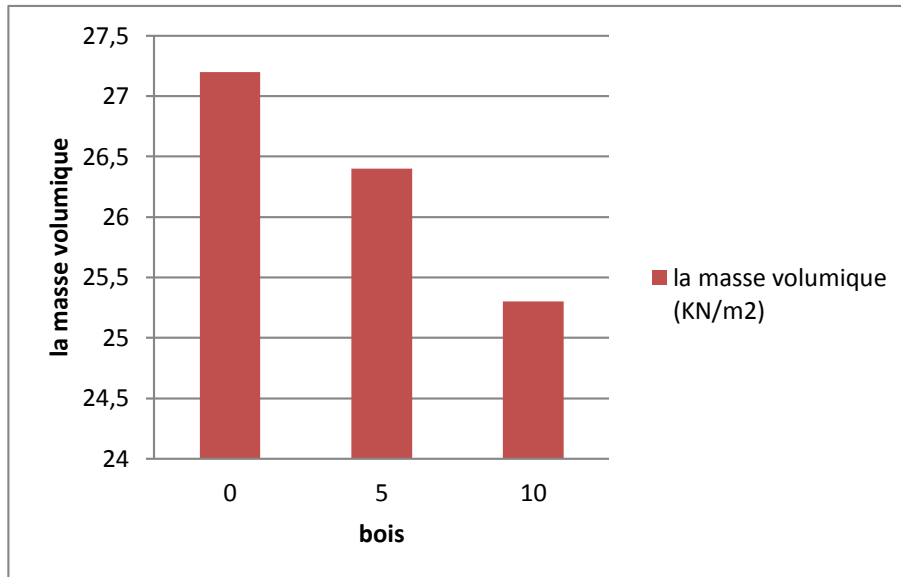


Figure III.1 L'évolution de la masse volumique de l'Argile en fonction du résidu de bois

Interprétation :

On constate que la masse volumique diminue de 1% par apport à la valeur initiale au premier ajout de bois (5%), puis elle continue à diminuer pour atteindre 1.07 % par apport à la valeur initiale à 10% d'ajout de résidu de bois, ce qui signifie que le résidu de bois a allégé le sol d'argile. Mais on a remarqué qu'au 10% d'ajout la quantité visuelle du résidu est plus grande que celle du sol lui-même c-à-d le volume du résidu est devenu plus grand que celui du sol. Donc on peut dire qu'à cet ajout les caractéristiques du résidu de bois commencent à dominer les valeurs de la masse volumique.

III.3.Cisaillement :

III.3.1. Argile :

Tableau III.2 Résultats de l'essai de Cisaillement avec résidu de bois (Argile)

Bois(%)	0	5	10
l'angle de frottement (°)	9°	31°	14°

la cohésion (Kpa)	40,6	0,2	49,3
-------------------	------	-----	------

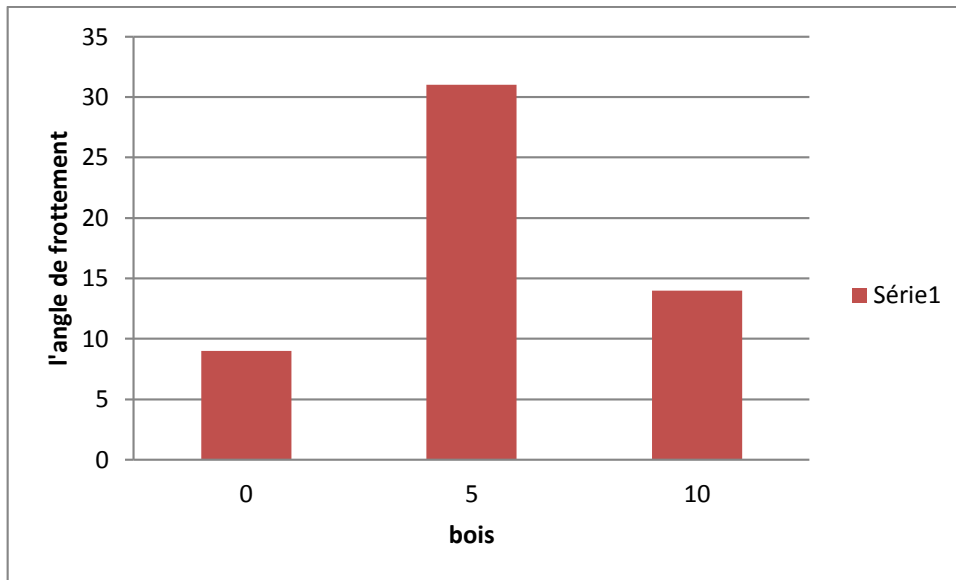


Figure III.2 L'évolution de l'angle de frottement de l'Argile en fonction du résidu de bois

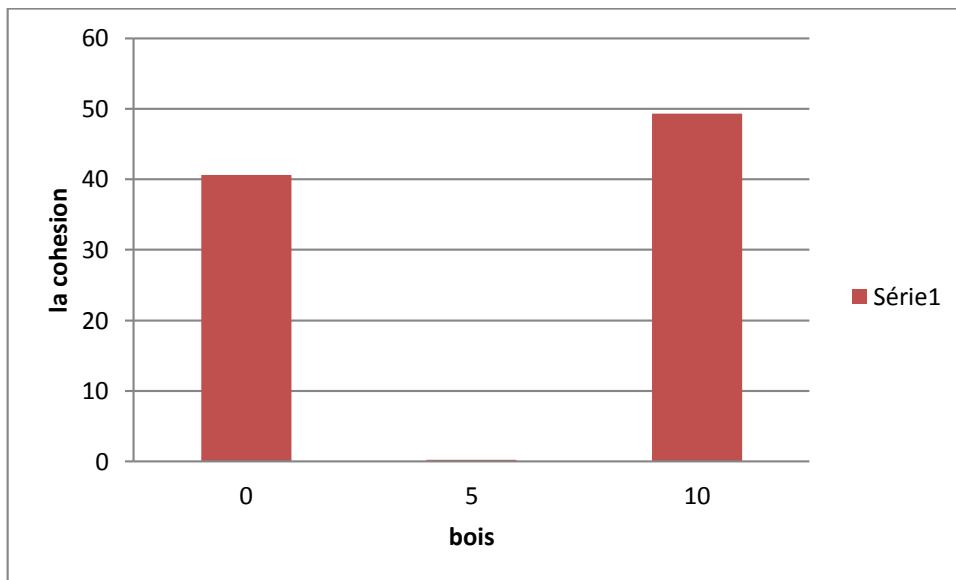


Figure III.3 L'évolution de la cohésion de l'Argile en fonction du résidu de bois

Interprétation :

D'après les résultats ci-dessus, nous pouvons bien remarquer que l'angle de frottement de l'argile atteint une valeur maximale (plus de 3 fois celle de l'angle du frottement initiale) avec un ajout de 5% du résidu de bois, et il tend à retourner à sa valeur initiale au-delà de 10% d'ajout. Et vice-versa pour la cohésion, elle tend à s'annuler au 5% d'ajout, puis elle augmente à une valeur supérieure à celle de l'argile lui-même à 10% d'ajout.

III.3.2. Sable :

Tableau III.3 Résultats de l'essai de Cisaillement avec résidu de bois (Sable)

Bois (%)	0	5	10
L'angle de frottement (°)	27	23	21
La cohésion (Kpa)	0.5	42.5	66.3

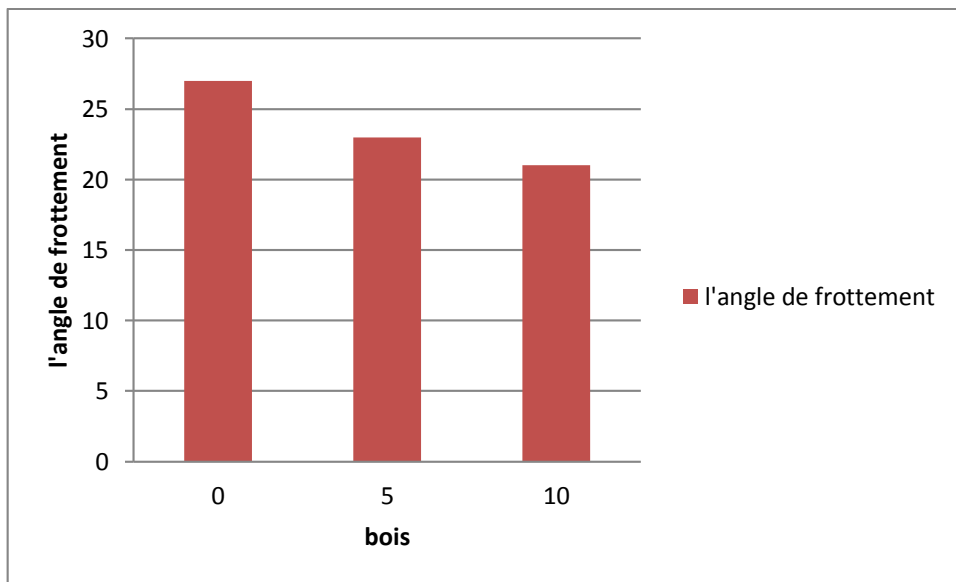


Figure III.4 L'évolution de l'angle de frottement du sable en fonction du résidu de bois

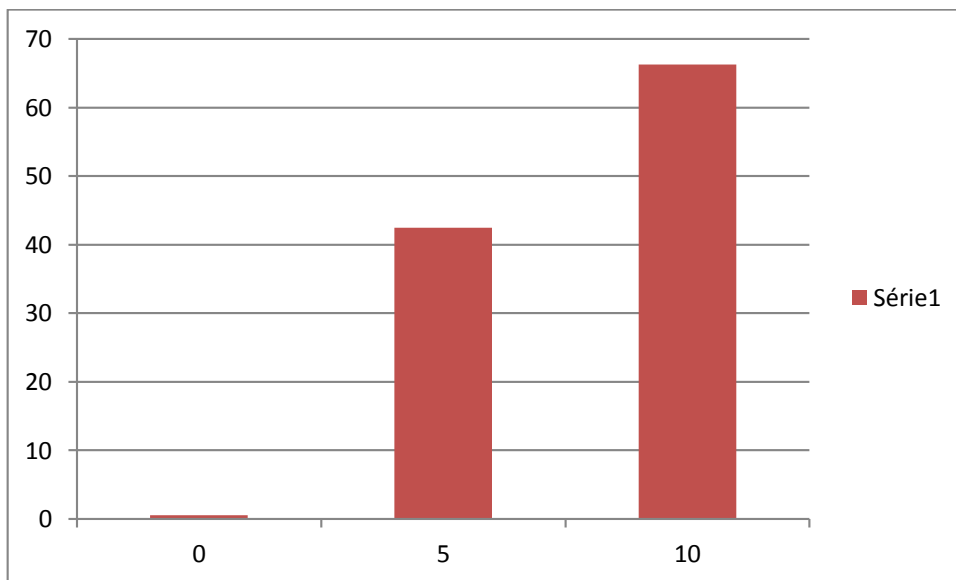


Figure III.5 L'évolution de la cohésion du sable en fonction du résidu de bois

Interprétation :

D'après les résultats ci-dessus, on constate que l'angle de frottement du sable diminue de 15% par apport à l'initiale quand l'ajout est de 5%, et de 22.22% au 10% d'ajout du résidu de bois. Et vice-versa pour la cohésion, elle augmente au 5% d'ajout d'une très grande valeur (85 fois la cohésion initiale), et elle continue à augmenter pour un ajout de 10% du résidu pour atteindre 133 fois la cohésion initiale.

III.4. Limites d'atterberg :

Tableau III.4 Résultats d'essai de la limite d'atterberg avec résidu de bois

Bois (%)	0	5	10
WL (%)	43.671	44.592	51.859
WP (%)	21.710	22.420	25.555
IP (%)	21.961	22.172	26.304
Ic	1,474	2,011	1,971
IL	-0,474	-1,011	-0,971

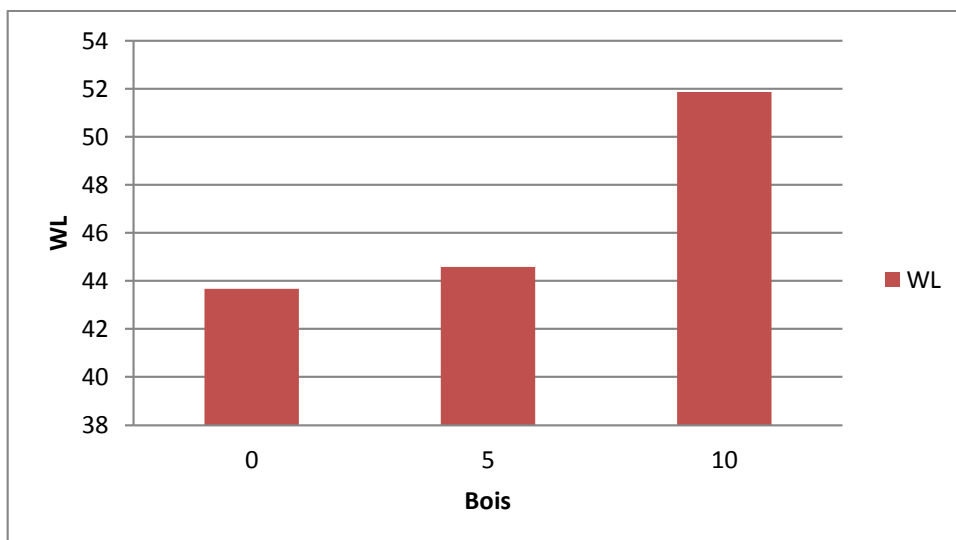


Figure III.6 L'évolution de WL de l'argile en fonction du résidu de bois

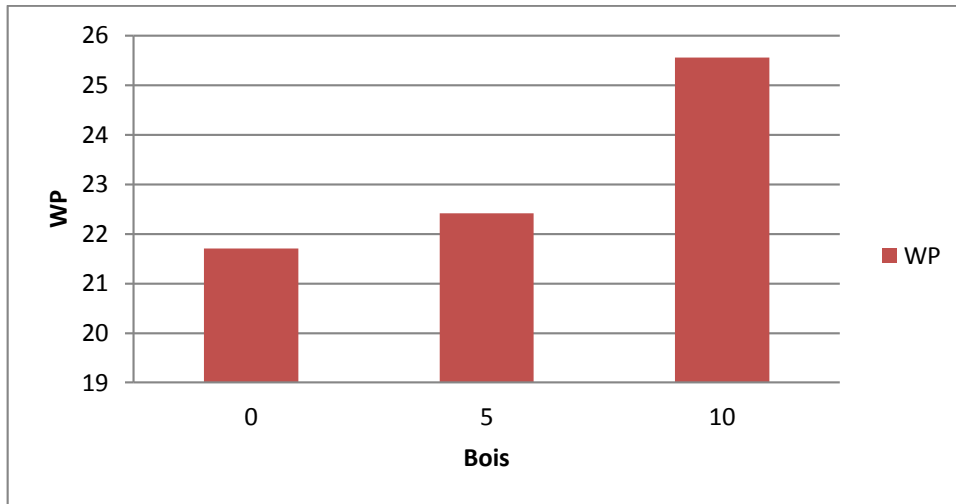


Figure III.7 L'évolution de WP de l'argile en fonction du résidu de bois

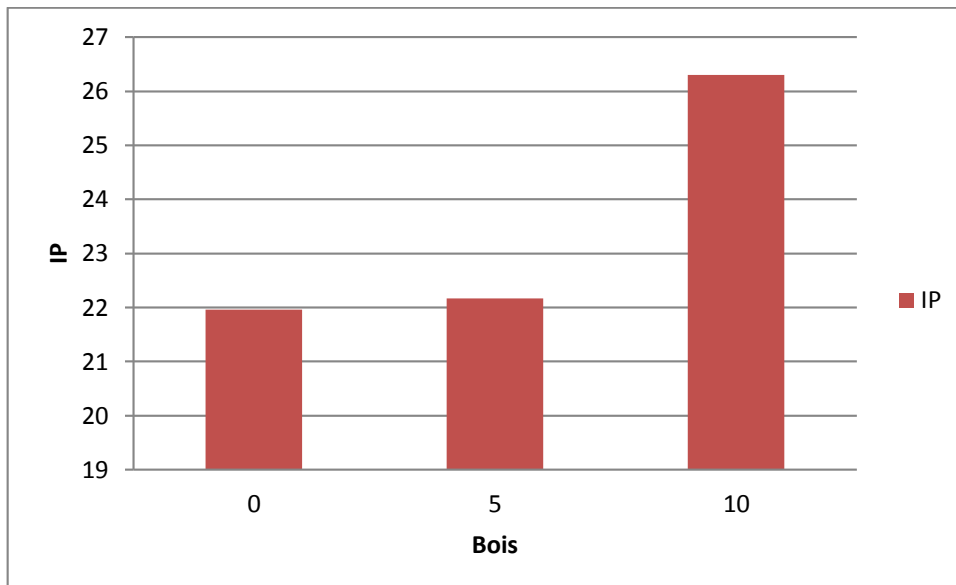


Figure III.8 L'évolution d'IP de l'argile en fonction du résidu de bois

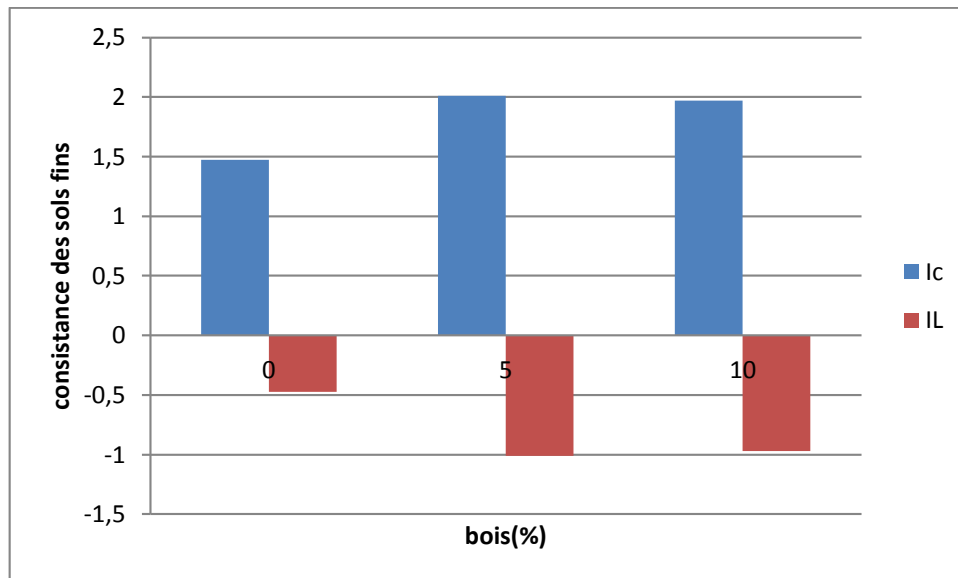


Figure III.9 L'évolution d'Ic et IL de l'argile en fonction du résidu de bois

Interprétation :

- ❖ On remarque que l'évolution de W_L , W_P et I_P est croissante en fonction du résidu de bois, ces trois paramètres de consistance subit une augmentation très importante au 10% d'ajout. Donc on constate que notre argile jusqu'au 5% d'ajout reste toujours Argile Inorganique de Plasticité Moyenne, par contre à 10% d'ajout il devient un Argile Organique de haute plasticité.
- ❖ Pour l'évolution des états de consistance Ic et IL on remarque une augmentation de presque 73% par rapport aux Ic et IL initiaux, puis une très légère diminution de 4% par rapport aux Ic et IL qui les précèdent (à 5% d'ajout). Donc notre argile de consistance solide très dure est devenue plus solide et même très très dure à 5% d'ajout, pour essayer de retourner lentement à son état initiale a partir de 10% d'ajout.

III.5. Comparaison entre les deux sols :

Comme le seul essai avec résidu de bois quant à put l'effectuer pour les deux sols est le cisaillement, on va essayer de faire une comparaison entre les résultats.

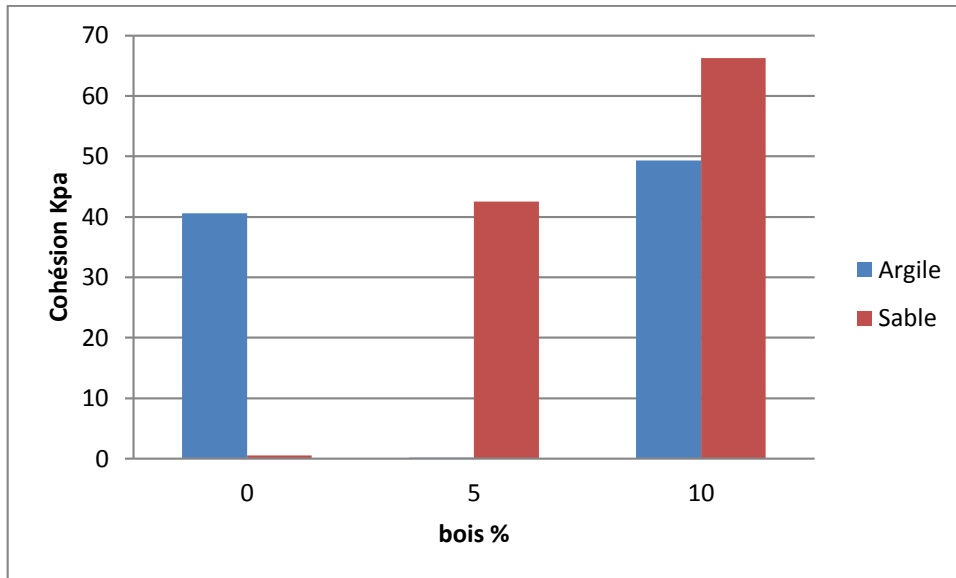


Figure III.10 L'évolution de la cohésion des deux sols en fonction du résidu de bois

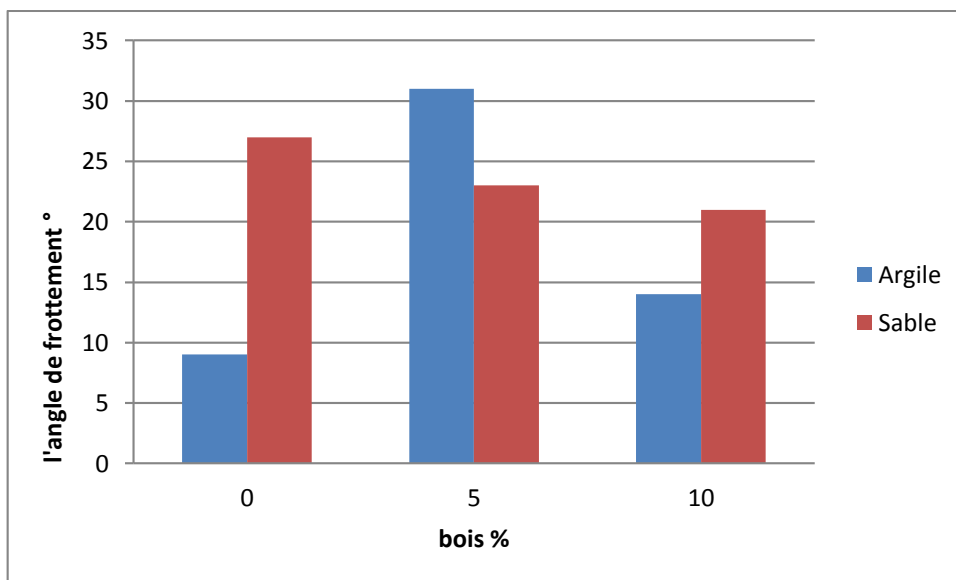


Figure III.11 L'évolution de l'angle de frottement des deux sols en fonction du résidu de bois

On constate :

- Qu'au 5% de résidu de bois les caractéristiques mécaniques des deux sols se renverse c-à-d que la cohésion de l'argile s'annule et celle du sable augmente plus que de l'argile à son état initiale, ainsi que l'angle de frottement de l'argile augmente plus même que celle du sable à son état initiale alors que celle de ce dernier diminue. Ce qui peut nous conduire à dire, que à 5% d'ajout de résidu de bois l'argile s'améliore mécaniquement est devient comme le sable et même mieux en ce qui concerne la cohésion et l'angle de frottement.

- au 10% de résidu de bois les caractéristiques mécaniques des deux sols sont complètement perturbées.

CONCLUSION GENERALE

Dans ce mémoire, l'objectif principal était de caractériser des sols avec un ajout de résidu de bois.

Dans ce but, deux types de sol différents ont été étudiés l'un est le sable qui présente un sol pulvérulent et l'autre est l'argile qui présente un sol cohérent. Ces deux sols ont été caractérisés à différents ajouts de résidu de bois. On a commencé par le classement des deux sols, puis on a essayé d'étudier l'évolution des caractéristiques en fonction du résidu de bois. L'exploitation des résultats obtenus permet de conclure que :

- ❖ A un ajout de 5% de résidu de bois l'argile est allégée mais sa valeur de la masse volumique reste acceptable. Tandis qu'à 10% d'ajout l'argile est très allégée et sa valeur de la masse volumique est inacceptable car elle est hors intervalle.
- ❖ L'évolution de W_L , W_P et I_P est croissante en fonction du résidu de bois, avec un saut très important au 10% d'ajout. De 0% à 5% d'ajout notre argile est Inorganique de Plasticité Moyenne, il devient organique de haute plasticité à 10% d'ajout.
- ❖ Notre argile a une consistance solide très dure en se transformant à plus solide et même très très dure à 5% d'ajout cet assèchement ne produit aucun retrait. Donc notre argile manifeste une très grande résistance au cisaillement et, sous l'effet d'une charge, les déformations sont faibles avant qu'il ait rupture. A 10% d'ajout il commence à se lâcher un peu.
- ❖ A 5% de résidu de bois l'angle de frottement de l'argile augmente de trois fois celle de l'angle du frottement initiale, tandis que celle du sable diminue de 15% par rapport à l'initiale, et vice-versa pour la cohésion ce qui signifie qu'à ce pourcentage de résidu de bois l'argile est vraiment améliorée à un point quant à dire que c'est du sable par contre le sable perd ces caractéristiques.
- ❖ A 10% de résidu de bois les caractéristiques mécaniques (angle de frottement et cohésion) des deux sols sont complètement perturbées.

- ❖ On conclue quant peut utiliser l'argile à 5% de résidu de bois comme étant un sable, mais avant ça il faut voir tous ces caractéristiques soit chimiques, soit physiques et même mécaniques qui n'ont pas étaient étudiier.
- ❖ Un sol pulvérulent (comme les sables) qui contient des résidus de bois c'est à éviter.
- ❖ Malgré quant n'a pas caractérisé le résidu de bois utilisé on peut déduire que notre résidu possède un angle de frottement importante et une cohésion moyen.

Bien sur le problème reste posé sur la valeur du pourcentage du résidu à ajouté. Les perspectives de ce travail consiste donc à caractérisé plusieurs sols à différents caractéristique avec un ajout de préférence ne dépasse pas les 5%.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES:

[9] Guettouche Amar ; « Identification et classification des sols » chapitre 2, p 13-51

[2]http://www.homejardin.com/coup_de_pouce_differeents_sols/aide_conseil_assistance_explcations.html

- [8] Jacques Lérau ; géotechnique 1 cours ; chapitre 1 ; 3^{ème} A ingénierie de la construction. Département de Sciences et Technologies Pour l'Ingénieur ; institut national des sciences appliquées de Toulouse. 2005 - 2006
- [3] <https://fr.wikipedia.org/wiki/Sable>
- [4] <https://construction-maison.ooreka.fr/astuce/voir/617185/les-differents-types-de-sable>
- [7] <http://collections.banq.qc.ca/ark:/52327/bs38393>
- [6] Khaled MEFTAH « Cours Mécanique des sol » Septembre 2008 ; 97 p
- [5] <https://fr.wikipedia.org/wiki/Argile>
- [10] M EL GONNOUNI « Résistance au cisaillement des sols » Chapitre 4 ; 26 p
- [12] <https://fr.wikipedia.org/wiki/Bois>
- [11] <http://www.batiweb.com/dictionnaire/definition/bois-119.html>
- [13] HAMIDA MOHAMED LAMINE « effet de l'humidité sur les caractéristiques thermiques et mécaniques dematériaux utilises dans la construction » mémoire de magistère en physique : Energétique : Photothermique ; 2010. 92p
- [15] Service de l'énergie et de l'environnement ; « Elimination des déchets de bois » Édité par Tombet, Peseux, sene@ne.ch, www.ne.ch/sene Version 24.04.2017
- [14] Patrick LANGBOUR, Jean GÉRARD, Daniel GUIBAL et Kaoutar MAHLANI. « Caractérisation technologique et valorisation en bois d'œuvre du pin d'Alep de la région Provence-Alpes-Côte d'Azur » forêt méditerranéenne t. XXXII, n° 3, septembre 2011
- [1] Guide pédagogique « Les sols » - Les Journées de l'ERE 2012-2013 Conception : Association nationale Les petits débrouillards.