



**Ministère de l'enseignement supérieur
Et de la recherche scientifique**
Université Mohamed Boudiaf - M'sila
Faculté de technologie



DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL

MEMOIRE

**Présenté pour l'obtention du diplôme de
MASTER**

FILIERE : Génie Civil

SPECIALITE : Structure

THEME

**INFLUENCE DE L'AJOUT DE
DECHETS DE VERRE SUR LES
CARACTERISTIQUES PHYSIQUES
D'UN SOL AFFAISSABLE**

Dirigé par :

Mme. BAKIR Nassima

Présenté par :

DJAGHAM Maroua

Promotion : 2015/2016.

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

The background of the page is a soft-focus image of pink roses and scattered petals. A decorative border of small, light pink roses and petals frames the central text area. The word "REMERCIEMENT" is written in a blue, serif, all-caps font.

REMERCIEMENT

Je remercie :

*En premier lieu Allah pour tout ce qu'il m'a donné et
M'a procuré.*

En particulier mon encadreur :

Mme : BAKIR Nassima.

Mes parents, pour leurs sacrifices.

Et la direction du département de Génie Civil

Université Mohamed Boudiaf M'sila.

Mes remerciements à tous mes enseignants

*Je remercie également le président et les membres de
jury d'avoir accepté d'examiner mon travail.*

DEDICACES

Je dédié ce travail :

A mes chers parents

Fatima, atheman, daou

A mes sœurs

Ilham, om Kaltoumi, remisa

A mes frères

Medjdi, Abou bakr, Osama, raian

A mes copines intimes

Houda bou chelaleg, dalal bou Aziz, marouf Siham

A l'ensemble de mes amis surtout

Houda ben Yahia, gazal ratiba, yahi kais

Tout ma famille



CHAPITRE I

<i>I-1-INTRODUCTION</i>	<i>3</i>
<i>I-2- Les dénominations des sols Affaissables</i>	<i>3</i>
<i>I-3- Sol affaissable et structure métastable</i>	<i>4</i>
<i>I-4- propriétés des sols Affaissables</i>	<i>5</i>
<i>a- Les propriétés physiques des sols affaissables</i>	<i>5</i>
<i>b- Le poids volumique des grains solides (γ_s)</i>	<i>5</i>
<i>c- Le poids volumique</i>	<i>5</i>
<i>d- La teneur en eau (w)</i>	<i>5</i>
<i>e-La porosité (n)</i>	<i>5</i>
<i>f- La perméabilité (k)</i>	<i>6</i>
<i>I-5- Types des sols Affaissables</i>	<i>6</i>
<i>a- Les lœss</i>	<i>6</i>
<i>b- Dépôts éoliens</i>	<i>6</i>
<i>c- Dépôts alluvionnaires</i>	<i>7</i>
<i>d- Dépôts résiduels</i>	<i>7</i>
<i>I-6- Classement des sols affaissables</i>	<i>7</i>
<i>I-7- Les cause d'inondation des sols Affaissables</i>	<i>8</i>
<i>I-8- Répartition des zones arides</i>	<i>9</i>
<i>a- Dans le monde</i>	<i>9</i>
<i>b-Dans l'Algérie</i>	<i>9</i>
<i>I-9-Nature géologique du sol</i>	<i>10</i>
<i>I-10- Les Mécanismes de l'affaissement</i>	<i>11</i>

<i>I-11-des méthode pour étude Les caractéristiques physique d'un sol.....</i>	<i>14.</i>
<i>a-Essais Proctor.....</i>	<i>14</i>
<i>b-Masse spécifique >s ou Masse volumique absolue d'un sol.....</i>	<i>14</i>
<i>c-Limite d'Atterberg.....</i>	<i>15</i>
<i>XIII- Méthodes De Traitement Des Sols Affaissables</i>	<i>17</i>
<i>a-Traitement par compactage</i>	<i>18</i>
<i>b-Traitement par pré chargement</i>	<i>18</i>
<i>c- Traitement par colonne ballastée.....</i>	<i>19</i>
<i>d- Compactage par explosifs</i>	<i>20</i>
<i>e- Vibrocompacta.....</i>	<i>20</i>
<i>f-Traitement par substitution.....</i>	<i>21</i>
<i>g- Traitement thermique</i>	<i>21</i>
<i>XIII-8-Traitement par injection</i>	<i>21</i>
<i>XIII-9- Traitement chimique</i>	<i>22</i>
<i>XIII-10- : Traitement par drains verticaux (DV)</i>	<i>23</i>
<i>XIV- Le choix basé sur classes granulométriques et l'état du sol.....</i>	<i>24</i>
<i>XVI- Les Méthodes Prédictives D'affaissement</i>	<i>24</i>
<i>a- Méthodes empiriques.....</i>	<i>24</i>

CHAPITRE II

<i>PROGRAMME EXPERIMENTALET PROCEDURES D'ESSAIS</i>	27
<i>I- INTRODUCTION</i>	27
<i>II- MATERIAUX UTILISE</i>	27
<i>A- le kaolin</i>	27
<i>b- Déchets de verre</i>	28
<i>c- Le sable</i>	29
<i>d- Le sol reconstitué</i>	29
<i>III- ESSAIS PRELIMINAIRES</i>	30
<i>a-Analyse granulométrique</i>	30
<i>b-Analyse Sédimentométrie</i>	31
<i>IV : Masse volumique apparente et spécifique</i>	33
<i>a- Masse volumique apparente</i>	33
<i>b- Masse volumique absolue</i>	34
<i>V- Equivalent de sable</i>	36
<i>VI-Essai de bleu de méthylène : NF P 94-068</i>	38
<i>a- Principe de l'essai</i>	38
<i>b- Préparation de l'échantillon</i>	39
<i>VIII-Limites d'Atterberg (NF P 94-051\ 1993)</i>	40
<i>a- La limite de liquidité W_L</i>	41
<i>b- La limite de Plasticité W_P</i>	41
<i>c- L'indice de plasticité I_P</i>	41

<i>IX-Essai Proctor (NF P 94-093 \ 1999)</i>	43
<i>a- Principe de l'essai de compactage</i>	43
<i>a-1- Appareillage spécifique</i>	44
<i>XI-limite de liquidité- la méthode de cône de pénétration</i>	46
<i>a-principe de l'essai</i>	46
<i>b-Appareillage</i>	46
<i>c-Martiale pour la réalisation de l'essai</i>	47
<i>XI-4-Mode opératoire</i>	48

CHAPITRE III

<i>- RÉSULTATS DES ESSAIS PRÉLIMINAIRES</i>	49
<i>III-1- Analyse granulométrique par tamisage</i>	49
<i>III-2- Analyse granulométrique par tamisage de sol reconstitue</i>	50
<i>III-3- Equivalent de sable</i>	53
<i>III-4- la masse volumique</i>	54
<i>III-5- la masse volumique absolue</i>	54
<i>III-6- Masse volumique apparente</i>	56
<i>III-7- Bleu de méthylène</i>	57
<i>III-8- Essai de Proctor</i>	58
<i>III-8-1-Sol reconstitué non traité</i>	59
<i>III-8-2-Sol reconstitué traité par 6% de verre</i>	59

III-9-limites d'Atterberg	59
a- Le kaolin	59
b-Le sol reconstitué non traite	61
c- le sol reconstitué traite par 2% de verre.....	62
d- le sol reconstitué traite par 3% de verre.....	65
e- le sol reconstitué traite par 4% de verre.....	68
f- le sol reconstitué traite par 5% de verre.....	71
g- le sol reconstitué traite par 6%de verre.....	74
h- le sol reconstitué traité par 7%de verre.....	77
i- le sol reconstitué traité par 8%de verre.....	80
III-10-limites de liquidité-la méthode de cône de pénétration	83
a- Le sol reconstitué non traite.....	83
b- le sol reconstitué traite par 2% de verre.....	84
c- le sol reconstitué traite par 3% de verre.....	85
d- le sol reconstitué traite par 4% de verre.....	86
f- le sol reconstitué traite par 5% de verre.....	87
g- le sol reconstitué traite par 6%de verre.....	88
h- le sol reconstitué traité par 7%de verre.....	89
i- le sol reconstitué traité par 8%de verre.....	90

VI-1-Résultats des caractéristiques d'identification	92
1-Analyse granulométrique	92.
2-La masse volumique.....	92
3-Equivalent de sable.....	93
4- Essai de bleu de méthylène.....	93

Liste des tableaux

CHAPITRE III

<i>Tableau III-1 : résultats de l'analyse granulométrique de sable.....</i>	<i>49</i>
<i>Tableau III-2 : Résultats de l'analyse granulométrique par tamisage des sols reconstitutions...</i>	<i>51</i>
<i>Tableau III-3 : Granulométrie par laser de kaolin.....</i>	<i>52</i>
<i>Tableau III-4 : résultats d'équivalent de sable.....</i>	<i>53</i>
<i>Tableau III-5 : résultats du poids spécifique du sable.....</i>	<i>53</i>
<i>Tableau III-6 : résultats du poids spécifique absolu du kaolin.....</i>	<i>54</i>
<i>Tableau III -7 : résultats du poids spécifique absolu du sol reconstitué.....</i>	<i>54</i>
<i>Tableau III-8 : résultats du poids spécifique absolu du le déchet de verre.....</i>	<i>54</i>
<i>Tableau III-9 : résultats masse volumique apparente de sable sans choc.....</i>	<i>55</i>
<i>Tableau III-10 : résultats masse volumique apparente du kaolin.....</i>	<i>55</i>
<i>Tableau III-11 : résultats masse volumique apparente de sol reconstitue.....</i>	<i>55</i>
<i>Tableau III-12 : résultats d'essai bleu de méthylène du sable.....</i>	<i>56</i>
<i>Tableau III-13 : résultats d'essai bleu de méthylène du kaolin.....</i>	<i>56</i>
<i>Tableau III-14 : résultats d'essai bleu de méthylène du sol reconstitué.....</i>	<i>56</i>
<i>Tableau III-15 : résultats de l'essai Proctor.....</i>	<i>57</i>
<i>Tableau III-16 : résultats de l'essaiProctor.....</i>	<i>58</i>
<i>Tableau III-17 : Teneurs en eau moyenne du kaolin.....</i>	<i>69</i>
<i>Tableau III-18 : limites plasticité du kaolin.....</i>	<i>60</i>
<i>Tableau III-19 : Teneurs en eau moyenne du sol reconstitué non traité.....</i>	<i>61</i>
<i>Tableau III-20 : limites plasticité du sol reconstitué non traité</i>	<i>61</i>

Tableau III-21 : Teneurs en eau moyenne du sol reconstitué traité par 2% de verre(1).	62
Tableau III-22 : limites plasticité du sol reconstitué traité par 2% de verre(1)	63
Tableau III-23 : Teneurs en eau moyenne du sol reconstitué traité par 2% de verre(2).	64
Tableau III-24 : limites plasticité du sol reconstitué traité par 2% de verre(2)	64
Tableau III-25 : Teneurs en eau moyenne du sol reconstitué traité par 3% de verre (1)	65
Tableau III-26 : limites plasticité du sol reconstitué traité par 3% de verre (1).....	66
Tableau III-27: Teneurs en eau moyenne du sol reconstitué traité par 3% de verre(2)	67
Tableau III-28 : limites plasticité du sol reconstitué traité par 3% de verre(2)	67
Tableau III-29 : Teneurs en eau moyenne du sol reconstitué traité par 4% de verre(1)	68
Tableau III-30 : limites plasticité du sol reconstitué traité par 4% de verre (1).....	69
Tableau III-31 : Teneurs en eau moyenne du sol reconstitué traité par 4% de verre(2)	70
Tableau III-32 : limites plasticité du sol reconstitué traité par 4% de verre (2).....	70
Tableau III-33 : Teneurs en eau moyenne du sol reconstitué traité par 5% de verre(1)	71
Tableau III-34 : limites plasticité du sol reconstitué traité par 5% de verre (1).....	72
Tableau III-35 : Teneurs en eau moyenne du sol reconstitué traité par 5% de verre(2)	73
Tableau III-36 : limites plasticité du sol reconstitué traité par 5% de verre (2).....	73
Tableau III-37 : Teneurs en eau moyenne du sol reconstitué traité par 6% de verre(1)	74
Tableau III-38 : limites plasticité du sol reconstitué traité par 6% de verre (1).....	75
Tableau III-39 : Teneurs en eau moyenne du sol reconstitué traité par 6% de verre(2)	76
Tableau III-40 : limites plasticité du sol reconstitué traité par 6% de verre (2).....	76
Tableau III-41 : Teneurs en eau moyenne du sol reconstitué traité par 7% de verre(1)	77
Tableau III-42 : limites plasticité du sol reconstitué traité par 7% de verre (1).....	78
Tableau III-43 : Teneurs en eau moyenne du sol reconstitué traité par 7% de verre(2)	79
Tableau III-44 : limites plasticité du sol reconstitué traité par 7% de verre (2).....	79

Tableau III-45 :	<i>Teneurs en eau moyenne du sol reconstitué traité par 8% de verre(1)</i>	80
Tableau III-46 :	<i>limites plasticité du sol reconstitué traité par 8% de verre (1)</i>	81
Tableau III-47 :	<i>Teneurs en eau moyenne du sol reconstitué traité par 8% de verre(2)</i>	82
Tableau III-48 :	<i>limites plasticité du sol reconstitué traité par 8% de verre (2)</i>	82
Tableau III-49 :	<i>limites liquidité du sol reconstitué non traité</i>	83
Tableau III-50 :	<i>limites liquidité du sol reconstitué traité par 2% de verre</i>	84
Tableau III-51 :	<i>limites liquidité du sol reconstitué traité par 3% de verre</i>	85
Tableau III-52 :	<i>limites liquidité du sol reconstitué traité par 4% de verre</i>	86
Tableau III-53 :	<i>limites liquidité du sol reconstitué traité par 5% de verre</i>	87
Tableau III-54 :	<i>limites liquidité du sol reconstitué traité par 6% de verre</i>	88
Tableau III-55 :	<i>limites liquidité du sol reconstitué traité par 7% de verre</i>	89
Tableau III-56 :	<i>limites liquidité du sol reconstitué traité par 8% de verre</i>	90

CHAPITER VI

Tableau III-1 :	<i>les valeurs d'IP après le traitement par le déchet de verre</i>	94
------------------------	--	----

Liste des figures

CHAPITRE I

<i>Figure I-1. Carte mondiale modern des zones arides.....</i>	<i>9</i>
<i>Figure I-2.Répartition des précipitations dans le nord de L'Algérie FAO 2005.....</i>	<i>10</i>
<i>Figure I-3. Liaison par tension capillaire.....</i>	<i>13</i>
<i>Figure I-4.Liaison par silt.....</i>	<i>13</i>
<i>Figure I-5.Liaison par de l'argile floculé.....</i>	<i>13</i>
<i>Figure. I-6. Liaison par des agrégats d'argile.....</i>	<i>13</i>
<i>Figure I-7. Principe de traitement par pré chargement.....</i>	<i>19</i>
<i>FigureI-8. Compactage par vitro-sonde.....</i>	<i>20</i>
<i>Figure I-9. Traitement par injection.....</i>	<i>22</i>
<i>FigureI-10.Traitement chimique à la chaux et au ciment.....</i>	<i>23</i>
<i>FigureI-11. Les champs d'application des différentes techniques de traitement.....</i>	<i>24</i>

CHAPITER II

<i>Figure II-1 : le kaolin.....</i>	<i>27</i>
<i>Figure II-2 : La fibre de verre.....</i>	<i>28</i>
<i>Figure II-3 : le sable.....</i>	<i>29</i>
<i>Figure II-4 : le sol reconstitué.....</i>	<i>30</i>

Figure II-5 : Batterie et série de tamis.....	31
Figure II-6 : Appareillage de sédimentométrie.....	33
Figure II-7 : entonnoir trépied.....	34
Figure II-8 : Pycnomètre verre de 50 cm.....	35
Figure II-9 : unebalance.....	35
Figure II -10 : ensemble complet pour équivalent de sable.....	38
Figure II-11 : Appareillage de l'essai de bleu.....	39
Figure II-12 : les taches sur un papier filtrent.....	40
FigureII.13 : Appareille de Casagrande.....	42
Figure II-14 : les étapes de la limite de plasticité.....	42
Figure II-15 : Courbe de Proctor.....	43
Figure II-16 : Appareillage spécifique pour essais de compactage (Proctor Normal).44	
Figure II-17 : Le cône de pénétration.....	46
Figure II-18 : Une balance.....	47
Figure II-19 : Une étuve.....	47

CHAPITRE III

Figure III-1 : courbe granulométrique par tamisage de sable.....	50
Figure III-2 : courbe granulométrique de kaolin.....	51
Figure III-3 : courbe granulométrique de kaolin.....	52
Figure III-2 : courbe essai Proctor (sol non traité).....	58

Figure III-3 : <i>courbe essai Proctor (sol traité par 6% de verre)</i>	59
Figure III-4 : <i>Position du kaolin testé dans l'abaque de Casagrande</i>	60
Figure III-5 : <i>Position du sol reconstitué non traité testé dans l'abaque de Casagrande</i>	62
Figure III-6 : <i>Position du sol reconstitué traité par 2% de verre testé dans l'abaque de Casagrande</i>	63
Figure III-7: <i>Position du sol reconstitué traité par 2% de verre testé dans l'abaque de Casagrande</i>	65
Figure III-8: <i>Position du sol reconstitué traité par 2% de verre testé dans l'abaque de Casagrande</i>	66
Figure III-9 : <i>Position du sol reconstitué traité par 3% de verre testé dans l'abaque de Casagrande</i>	
Figure III-10 : <i>Position du sol reconstitué traité par 3% de verre testé dans l'abaque de Casagrande</i>	68
Figure III-11 : <i>Position du sol reconstitué traité par 3% de verre testé dans l'abaque de Casagrande</i>	68
Figure III-12: <i>Position du sol reconstitué traité par 4% de verre testé dans l'abaque de Casagrande</i>	69
Figure III-13 : <i>Position du sol reconstitué traité par 4% de verre testé dans l'abaque de Casagrande</i>	71
Figure III-14 : <i>Position du sol reconstitué traité par 4% de verre testé dans l'abaque de Casagrande</i>	72
Figure III-15 : <i>Position du sol reconstitué traité par 5% de verre testé dans l'abaque de Casagrande</i>	73
Figure III-16 : <i>Position du sol reconstitué traité par 5% de verre testé dans l'abaque de Casagrande</i>	74
Figure III-17 : <i>Position du sol reconstitué traité par 5% de verre testé dans l'abaque de Casagrande</i>	75
Figure III-18 : <i>Position du sol reconstitué traité par 6% de verre testé dans l'abaque de Casagrande</i>	76

Figure III-19 : <i>Position du sol reconstitué traité par 6% de verre testé dans l'abaque de Casagrande.....</i>	<i>77</i>
Figure III-22 : <i>Position du sol reconstitué traité par 7% de verre testé dans l'abaque de Casagrande.....</i>	<i>78</i>
Figure III-23 : <i>Position du sol reconstitué traité par 7% de verre testé dans l'abaque de Casagrande.....</i>	<i>80</i>
Figure III-25 : <i>Position du sol reconstitué traité par 8% de verre testé dans l'abaque de Casagrande.....</i>	<i>81</i>
Figure III-26 : <i>Position du sol reconstitué traité par 8% de verre testé dans l'abaque de Casagrande.....</i>	<i>82</i>
Figure III-27 : <i>procès –verbal d'essai de sol reconstitué non traité.....</i>	<i>84</i>
Figure III-28 : <i>procès –verbal d'essai de sol reconstitué traité par 2% de verre.....</i>	<i>85</i>
Figure III-29: <i>procès –verbal d'essai de sol reconstitué traité par 3% de verre.....</i>	<i>86</i>
Figure III-30 : <i>procès –verbal d'essai de sol reconstitué traité par 4% de verre.....</i>	<i>87</i>
Figure III-31: <i>procès –verbal d'essai de sol reconstitué traité par 5% de verre.....</i>	<i>88</i>
Figure III-32 : <i>procès –verbal d'essai de sol reconstitué traité par 6% de verre.....</i>	<i>89</i>
Figure III-33: <i>procès –verbal d'essai de sol reconstitué traité par 7% de verre.....</i>	<i>90</i>
Figure III-34 : <i>procès –verbal d'essai de sol reconstitué traité par 8% de verre.....</i>	<i>91</i>

CHAPITRE IV

Figure VI-1 : <i>histogramme présenté la densité sec en fonction de la traité de déchet de verre.....</i>	<i>93</i>
Figure VI-2 : <i>histogramme d'IP avec le traitement de déchet essais 1.....</i>	<i>95</i>

Figure VI-3 : histogramme d'IP avec le traitement de déchet essais 2.....	95
---	----

Liste des notations

ΔH : Variation de la hauteur après mouillage.

H_0 : Hauteur initiale de l'échantillon.

e : L'indice des vides.

e_1 : L'indice des vides à la limite de liquidité.

k : Coefficient de tassement.

C_u : Coefficient d'uniformité du sol.

σ : Contrainte totale.

Δe : La variation de l'indice des vides après mouillage.

M : La masse de l'éprouvette du sol.

V : Le volume de l'éprouvette du sol.

d : Le diamètre de l'éprouvette du sol.

H_0 : La hauteur de l'éprouvette du sol.

γ_s : La masse volumique des grains solides.

Δh : Variation de la hauteur par inondation (affaissement).

H_0 : Hauteur initiale de l'éprouvette.

E_c : L'énergie de compactage.

M : Masse de l'échantillon.

N : Le nombre des chocs de la masse M sur le disque pour une seule couche sol.

e_{moy} : Indice des vides moyen.

e_i : Indice des vides.

Résumé

Le problème de l'identification des sols à effondrement brusque après inondation a fait l'objet de nombreux travaux de recherche aboutissant à multitudes résultats différents et parfois contradiction. Afin de tirer au clair cette question, l'approche adoptée dans cette étude a consisté dans une première étape à la détermination des caractéristiques physiques du sol (la granulométrie, les limites d'Atterberg, l'optimum de Proctor,.....), puis à déterminer l'influence des déchets de verre sur l'amélioration de ces derniers notamment sur les limites de consistance.

Abstract

A lot of research works regarding the identification problem of sudden collapsing soils after flooding have been carried out. These led to various results which were sometimes contradictory. In order to clarify this question, the approach adopted in this study consisted, first of all, to determine initially the characteristics of the soil (granulometry, the limits of Atterberg, the optimum of Proctor....).

ملخص

ان التعرف على مشكل انهيار التربة المفاجئ بعد الفيضان كان هدف عدة بحوث التي توصلت الى عدة نتائج مختلفة وفي بعض الاحيان متناقضة. لنزع الغموض على هذا السؤال قمنا اولاً بتحديد الخصائص الفيزيائية للتربة المعدة للدراسة (قياس نسبة الحبيبات، حد السيولة، حد الدانة، أمثل بروكتور.....) بعد معرفة تأثير الياف الزجاج على التربة قصد تحسينها

INTRODUCTION GENERALE

Les sols Affaissablés appelés aussi « Collapsible » sont définis comme des structures partiellement saturées pouvant avoir une importante déformation après mouillage avec ou sans chargement. C'est à dire subir un réarrangement radical de leurs particules, suivi d'une grande diminution brusque de leur volume, après avoir été inondées à l'eau avec ou sans surcharges.

Les sols affaissablés ont une structure ouverte de masse Volumique sèche relativement faible et d'indice des vides élevé. L'affaissement de ces sols forme un risque majeur aux constructions dans plusieurs régions du monde

Le sud Algérien constitue une grande partie de ces sols affaissables à risque d'effondrement. Les Constructions des pipes et des différentes réalisations dans le domaine des hydrocarbures dans ces régions nécessitent une attention particulière et une étude approfondie afin de mieux comprendre les mécanismes d'affaissement de ces sols et de trouver les technique de leur stabilisation.

Les tassements importants qui résultent de l'utilisation des grandes quantités d'eau et les dommages qui en résultent vis-à-vis des ouvrages, surtout dans ces trois dernières décennies, ont donné une grande impulsion à la recherche concernant ces sols, notamment les méthodes de leurs identifications et de leurs traitements.

L'objectif de notre travail est de montrer qu'il est possible de modifier les caractéristiques physiques du sol affaissable dans le but de diminuer le potentiel d'affaissement à un niveau acceptable par un traitement adéquat, dans notre cas nous avons choisi d'étudier l'effet de l'ajout des déchets de verre sur les sols effondrables.

Notre travail sera subdivisé en 4 chapitres et nous allons commencer par :

- Une introduction générale sur les sols affaissa blés.
- Chapitre un qui est consacré à l'étude bibliographique du phénomène d'affaissement, en soulignant son origine et ses mécanismes et les méthodes de traitement.

- Le chapitre deux aborde la présentation des matériaux et du matériel utilisé ainsi que la présentation des différents modes opératoires des essais utilisés.
- Dans le troisième chapitre , nous allons présenter le programme d'essais pour la caractérisation physico-chimiques des matériaux de bases utilisés pour la confection du sol affaissable reconstitué, puis les essais mettant en évidence l'influence de la fraction de fibre de verre rajoutée sur le changement des caractéristiques physiques du sol des sols affaissables suivis de la présentation des résultats.
- au quatrième chapitre nous allons discuter et analyser les différents résultats trouvés.
- Une conclusion générale est donnée en fin de notre travail.

CHAPITRE I

SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE
SUR LES SOLS AFFAISSABLES

CHAPITRE I

SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LES SOLS AFFAISSABLES

I.1. Introduction :

Les sols affaissables sont ceux qui ont des structures ouvertes et qui deviennent instables sous certains changements des conditions environnementales, Derbyshire et al (1995). L'affaissement est la transition d'un état ouvert et métastable en un autre arrangement plus serré, or la structure ouverte des argiles sensibles, du lœss et des sables est une entité unifiant. Selon cette définition, les dépôts des sols partiellement saturés tels que le lœss et les sols complètement saturés telles que les argiles sensibles (bien qu'ils soient extrêmement différents dans leur processus de formation, leurs conditions environnementales et leur teneur en eau naturelle), peuvent être considérés comme sols affaissables. Un sol compacté du côté sec de la teneur en eau optimum paraît aussi être susceptible de s'affaisser. Un dépôt naturel du sol ayant une structure affaissable peut être un sol résiduel, un sol sédimenté par l'eau ou un sol éolien.

Ces sols sont localisés essentiellement dans les régions arides et semi arides. Ils concernent un nombre important de pays notamment ceux de l'hémisphère nord Situés entre les 30ème et 55ème parallèles ainsi que des pays d'Amérique du sud, Abele (1988).

Plusieurs recherches se développent dans le domaine de l'identification et de prévention des sols affaissables ainsi que des dispositions à prendre pour garantir une stabilité suffisante des ouvrages à ériger sur ces sols. Les mesures proposées par les auteurs dépendent, d'une part, de la profondeur du sol et d'autre part, de la capacité portante du sol qui requiert la structure de fondations, substitution ou traitement en place préalable chimique, thermique ou mécanique

La littérature indique qu'ils peuvent avoir plusieurs origines de formation. Cependant, ils ont toujours des propriétés communes d'être très poreux, et géologiquement récent, Sultan (1969).

I-2 Les dénominations des sols Affaissables

Parmi les nominations des sols Affaissables on note :

- ❖ Sols Affaissables.
- ❖ Sols effondrables.
- ❖ Sols collapsibles.
- ❖ Sols à macroporeux.
- ❖ Sols lœssiques.
- ❖ Sols sensibles au mouillage.

- ❖ Sols à rupture brusque.
- ❖ Sols métastables.
- ❖ Sols auto - tassants.
- ❖ Sols partiellement saturés.
- ❖ Sols évolutifs.
- ❖ Arènes argileuses.
- ❖ Argiles limoneuses

I.3. Sol affaissable et structure métastable :

Les sols dits affaissables et de structure métastable sont des sols qui deviennent instables sous un certain chargement ou sous des conditions environnementales données. Pour être métastables, ces sols doivent avoir une structure ouverte, c'est à dire que la matrice granulaire des particules solides doit avoir un arrangement ouvert capable de devenir rapidement et considérablement un arrangement serré produisant une structure stable (Sultan, 1969; Rogers, 1995). Un matériau granulaire ayant des particules angulaires compactées dénoté sec de la teneur en eau optimum peut former une structure capable de subir une densification supplémentaire, mais les sols affaissables classiques sont des matériaux naturels où la combinaison de type de particule (gros et forme) et le processus de sédimentation peuvent donner un dépôt affaissable de structure métastable.

Plusieurs définitions des sols affaissables ont été présentées par différents chercheurs (Sultan, 1969; Dudley, 1970; Hady, 1973; Jenkins et Knight, 1975; Booth, 1977; Rogers, 1995).

La majorité de ces chercheurs définissent l'affaissement du sol comme étant une réduction considérable du volume due à une augmentation du degré de saturation du sol partiellement saturé, avec ou sans chargement supplémentaire. Cette définition est limitée aux sols rencontrés dans les régions arides et semi-arides, et ne comprend pas les autres types de sols ayant des structures métastables tels que les sols résiduels et les argiles sensibles.

Rogers (1995) a défini le sol affaissable dans son sens le plus large de sorte que les différents types de sols affaissables rencontrés dans la pratique pourraient être reconnus et classifiés. Selon la définition présentée par Rogers, les sols affaissables naturels peuvent être divisés en trois groupes principaux : Sols résiduels, sols sédimentés par l'eau et sols éoliens (sols sédimentés par l'air).

Dans le cas des sols résiduels, la structure métastable se forme à partir du lavage des matériaux solubles. Les argiles sensibles saturées sont les principaux types de sols affaissables déposés par l'eau. Elles se trouvent en abondance à l'Est du Canada et en Scandinavie et elles existent dans un état stable qui dépend du niveau de contrainte appliquée au-delà duquel un affaissement brutal peut produire. Les sols affaissables sédimentés par l'eau et l'air se trouvent toujours dans les régions arides et semi-arides.

- Les sols sédimentés par l'air sont les dépôts les plus étendus de sols affaissables se trouvent dans plusieurs régions du monde.
- Généralement, ces types de sols se produisent dans des conditions partiellement saturées ou sèches. En se basant sur le concept du sol affaissable déjà présenté, il peut reproduire n'importe où dans le monde. Les sols affaissables ont une structure ouverte et métastable d'indice des vides élevé, de faible masse volumique sèche et de faible résistance liaison interarticulaire. Friedland et Ricardo (1993) ont rapporté que la recherche associée comportement des sols affaissables était encore limitée, et plusieurs questions reliées propriétés de ces sols restent sans réponses.

I-4 propriétés des sols Affaissables

Ces sols sont caractérisés par une structure macroporeuse à fort indice des vides. Ils sont principalement du type transporté, par voie éolienne notamment (les lœss) mais peuvent être aussi du type résiduel. En règle générale, ils présentent une teneur en eau assez faible et ne sont jamais saturés. Dans certains cas une cimentation naturelle des grains leur confère des caractéristiques mécaniques apparentes lorsqu'ils sont chargés à leur teneur en eau naturelle. Cependant toute humidification, même sans chargement supplémentaire, provoque l'effondrement de la structure et des déformations spectaculaires se produisent.

a- Les propriétés physiques des sols affaissables :

L'analyse des nombreuses études des propriétés physiques des sols Affaissables permet d'établir les caractéristiques principales des sols lœssiques ou Affaissables. On peut énumérer :

b- Le poids volumique des grains solides (γ_s) :

La valeur des poids volumiques des grains solides γ_s varie de 25 à 28 kN/m³.

c- Le poids volumique :

Le poids volumique des sols Affaissables varie de 13 à 21 kN/m³.

d- La teneur en eau (w) :

Dans la majorité des cas les sols Affaissables se caractérisent par une faible teneur en eau.

e - La porosité (n) :

Les valeurs de la porosité (ou de l'indice des vides) des sols Affaissables peuvent servir comme indicateur indirect de la probabilité d'existence des propriétés d'Affaissabilité de ces sol. Porosité totale des sols lœssiques est comprise entre 30 et 60 %.

f- La perméabilité (k) :

Le coefficient de perméabilité des sols lœssiques est de 2, 5 à 9 fois plus élevées dans la direction verticale que dans la direction horizontale.

1.5 Types des sols Affaissables :

Généralement la structure des sols Affaissables est formée en nids d'abeilles. La liaison entre les grains est assurée par une cimentation due à la présence des particules très fines. L'inondation du sol provoque l'élimination ou la réduction de cette cimentation, ce qui provoque la destruction d'une manière brusque, l'arrangement initial des grains, avec une remarquable diminution de volume du sol. Sont jugés comme Affaissables les sols suivants :

a- Les lœss :

Le lœss habituellement de couleur jaunâtre ou brun, est un sol sédimentaire Détritique meuble formé par l'accumulation de limon issus de l'érosion éolienne (déflation) est formé principalement de silice (quartz détritique) et de carbonate de calcium (CaCO_3). Il se caractérise par un très bon tri granulométrique dû à son origine éolienne, avec essentiellement des grains compris entre 10 et 50 μm . Ainsi au niveau granulométrique le lœss est un limon, il contient en proportion moindre des sables et des argiles (ces dernières pouvant être agglomérées et former des grains de limon fin). Il est homogène, sans stratifications mais avec une très forte porosité résultant d'une cimentation carbonatée des grains il résulte d'accumulation, sous climat froid et sec, de limons transportés par le vent depuis des zones sources (alluvions, dépôts fluvio-glaciaires, sédiments côtiers et estuariens, zones arides) soumises à une déflation éolienne. Une dérivation granulométrique vers les sables (lœss) peut être due à la proximité de la zone source lœss et donc à un tri éolien moins poussé Antoine et al, (2009).

b- Dépôts éoliens :

Ils sont constitués par des matériaux assez fins, légers, ayant de basses densités relatives et une faible cohésion. Ils sont transportés par le vent. Allant du lœss pour les plus fins au sable de dunes, de plages et des dépôts de poussières volcaniques pour les plus gros. La

Structure naturelle de ces sols peut être constituée par des liaisons cimentées d'argile telle que les sols lœssique, ces dépôts sont caractéristiques des zones arides où le niveau de la nappe est à une grande profondeur de la surface du sol. Au-delà de la saturation, liaisons cimentées d'argile s'affaiblissent énormément et perdent leur résistance, menant à la destruction rapide et totale de la structure du sol. Parfois ces dépôts éoliens se trouvent protégés contre les précipitations par la présence d'une croûte d'argile imperméable, cette croûte empêche l'entrée des eaux et préserve la structure naturelle du sol, pour cette raison

Même pendant les périodes à moyennes précipitations, les dépôts fins éoliens ne sont pas modifiés ou le sont partiellement.

c- Dépôts alluvionnaires

Sont des sédiments déposés par l'eau des inondations brusques ou les écoulements de boues dues à des courtes chutes de pluies espacés dans le temps. Ces dépôts se sèchent et se resaturent de nouveau qu'avec l'arrivée d'autres pluies qui contiennent des matériaux faiblement consolidés renfermant l'argile dont la qualité a une importance primordiale dans le comportement de ces sols.

d- Dépôts résiduels

L'origine de ces sols est l'érosion due à la désintégration et l'altération de la roche mère. Les dimensions des particules de ces sols vont du large fragment, gravier, sable, silt aux colloïdes et parfois composé de matière organique. La structure affaissable des grains est le résultat d'une solution d'un soluble et d'une matière colloïdale, cette formation donne un indice des vides plus ou moins élevé et une structure instable. Généralement les sols résiduels se présentent sous forme de couches stratifiées d'épaisseur allant de quelques centimètres à plusieurs mètres en fonction du climat et de la physionomie de la région.

I.6 Classement des sols affaissables

Urielle et Serran (1973-1974) ont classé les sols à effondrement brusque en deux (02) groupes :

Groupe 1 :

Les sols, dans lesquels se produisent un changement rapide dans la relation entre les pressions et les déformations sans atteindre la résistance à la rupture. En conséquence, la cause

De l'effondrement est seulement due au changement des pressions. Ce groupe comprend le limon, l'argile cimentée et les roches très poreuses.

Groupe 2 :

Les sols, qui sans la présence ou le changement des conditions provoquant l'effondrement même s'il n'y a pas de changement brusque de la pression. Tel est le cas des loess et certaines argiles contenant des sulfates, lors d'une humidification constante la relation entre contrainte-déformation est une courbe lisse continue sans rebondissements tranchants. La saturation se produit, cependant par un changement significatif du volume dû à l'augmentation de la pression interstitielle des pores provoquant l'appauvrissement de la résistance du sol au cisaillement.

I-7- Les causes d'inondation des sols Affaissables :

Quatre principaux types de mouillages, peuvent déclencher l'affaissement des sols :

1. Un mouillage superficiel et local, causé par les fuites d'eau provenant de la conduite souterraine lorsque les eaux de surface de la construction ne sont pas drainées. D'habitude ces eaux superficielles ne pénètrent pas à une grande profondeur du sol et il n'y a pas de remontée de la nappe phréatique. Dans cette situation, les tassements se produisent principalement dans les couches supérieures du sol, au-dessus de la zone mouillée.
2. Un intense mouillage local et profond, causé par le système d'irrigation ou les effluents industriels. Si le débit d'eau est assez important, le niveau de la nappe phréatique peut alors remonter et toute la zone du sol se trouve saturée dans un temps relativement court. Dans ce cas, le tassement peut être extrêmement accidentel et dangereux, englobant toute l'épaisseur de la couche du sol, soit sous l'effet de son poids propre ou sous l'effet des surcharges des constructions existantes.
3. Une remontée lente et relativement uniforme du niveau de la nappe phréatique, sous l'influence des sources d'eau extérieure à la zone des sols affaissables. Le tassement dans ce cas, il est uniforme et graduel.
4. Une augmentation graduelle et lente de la teneur en eau d'une couche épaisse du sol, résultant de la condensation de la vapeur d'eau et l'accumulation de la l'humidité (exemple quand la surface du sol est couverte du béton ou d'asphalte). Dans ce cas la cohésion interne des sols 'affaiblie partiellement, donnant des tassements lents et incomplets et augmentent avec l'humidité. L'affaissement ne peut être déclenché que par saturation à l'eau plus le chargement, ces deux facteurs agissent ensemble et en même temps

I -8- Répartition des zones arides

a- Dans le monde

Wri (2002) vient de proposer pour classer la zone aride de considérer les valeurs du rapport ratio précipitation annuelle / évapotranspiration potentielle moyenne annuelle (Figure

1), le monde à été divisé en :

- ❖ La zone hyper aride couvrant environs 11 millions de Kilomètres carrés, soit 8% des terres totales et elle correspond principalement au désert du Sahara.
- ❖ Les zones arides, semi-arides et subhumides sèche et couvrent près de 54 millions de kilomètres carrés, se rencontrent surtout dans les continents, mais elles sont principalement concentrées en Asie et Afrique

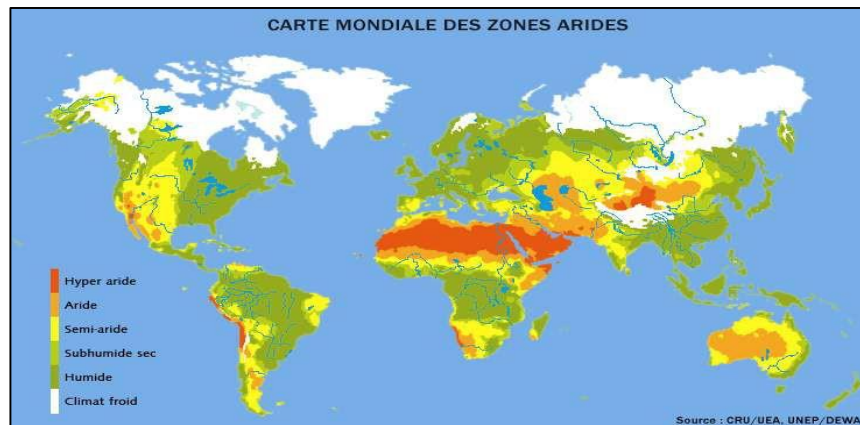


Figure I-1 : Carte mondiale modern des zones arides

b- Dans l'Algérie

La classification bioclimatique d'Emberger et sauvage a été largement adoptée en Régions méditerranéennes. Cinq étages du bioclimat méditerranéen ont été définis pour l'Algérie Saharien, aride, semi-aride, sub- humide et humide (Figure 2).

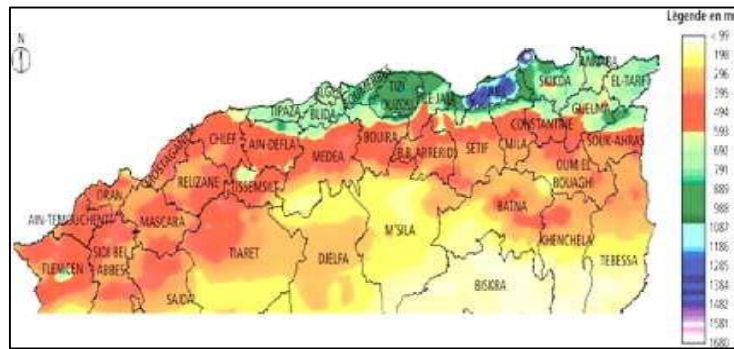


Figure I-2 : Répartition des précipitations dans le nord de L'Algérie FAO 2005.

On distingue selon Nedjraoui (2003) :

- La région semi- aride : 300- 600 mm
- La région aride : 300- 100 mm
- Le Saharien < 100 mm qui occupe 89,5% la superficie totale de l'Algérie. La superficie des Zones arides en Algérie selon le Houer ou (1995) est de 216000 Km², et 386000 Km² de zones

I-9-Nature géologique du sol

La liste des modes de déposition géologique pour lesquels le phénomène d'effondrement a été observé (Dudley 1970, Clémence et Minbar 1981, Alfi 1984) est assez vaste. On peut citer les dépositions d'origine :

- éolienne : sables, lœss (limons altérés et transportés par le vent),
- aérienne : cendres volcaniques,
- colluviale : débris de roche tombés par gravité d'une pente ou d'une falaise,
- alluviale : apporté par des coulées boueuses et des cours d'eau,
- résiduelle : altération physico-chimique des roches mères,
- anthropique : sols compactés par l'homme (remblais, barrages en terre, ...).

Cependant, la connaissance du type de dépôt ne permet pas d'en déduire le degré d'effondrement du sol du fait de l'importance d'autres paramètres. En revanche, elle informe sur son histoire et son état physico-chimique.

I-10- Mécanisme de l'affaissement

Généralement, il y a quatre facteurs nécessaires pour que l'affaissement se produise dans un sol partiellement saturé, Bardeen et al (1973), Lawton et Frigaszy (1992) et Mitchell (1993).

1. Une structure métastable, ouverte et partiellement saturée.
 2. Une contrainte totale appliquée assez élevée.
 3. Un agent de liaison ou de cimentation qui stabilise le sol à l'état partiellement saturé.
 4. L'addition de l'eau au sol cause la dégradation de l'agent de liaison, par conséquent, les ponts interarticulaires s'effondrent par cisaillement, aboutissant à la réduction du volume de la masse du sol. Casagrande (1932) a élaboré un modèle pour l'arrangement des particules de sable lâche limoneux affaissables. Dans ce modèle, les fines se consolident, gagnent une certaine résistance sous l'effet de la contrainte totale et jouent
 5. le rôle d'un liant des grains de sable. L'application d'une contrainte au sol à sa teneur en eau naturelle provoque une légère compression des fines, (figure I.3 (a)). Si l'eau est ajoutée au sol jusqu'à ce qu'elle atteigne une certaine teneur en eau, la liaison due aux fines ne résiste plus aux forces de micro cisaillement local et par conséquent, la structure des sols s'effondre, (figure I.3 (b)). Une étude microscopique a été réalisée sur les sols affaissables, partiellement saturés, prélevés de différentes régions du monde, en utilisant le Microscopie Électronique à Balayage (MEB), Barden et al (1973), (figure I.4). Cette étude se base sur l'idée de considérer des composantes de contraintes effectives : une due à la contrainte appliquée, et l'autre due aux forces de succion. Ces deux composantes développent une contrainte inter particulaire. La contrainte appliquée développe alors des contraintes de cisaillement et par conséquent, une instabilité potentielle aux contacts inter particulaires. Puisque la succion est une contrainte strictement normale, elle augmente la stabilité aux contacts inter particulaires. L'affaissement nécessite les trois conditions suivantes :
1. Une structure métastable, ouverte et partiellement saturée.
 2. Une contrainte appliquée assez élevée.
 3. Une valeur de résistance de liaison assez élevée pour stabiliser les contacts interarticulaires. Récemment, le Microscopie Électronique à Balayage (MEB) est utilisé par différents chercheurs, Gao (1988), pour étudier la structure de dépôts de loess,

Le MEB a révélé que le loess dans les régions arides était encore en état de développement et avait un potentiel d'affaissement élevé. Par contre le loess dans les régions humides présente un potentiel d'affaissement plus faible à cause de la résistance de cimentation importante entre les grains.

Alwail (1990) a étudié l'effet du matériau fin sur le mécanisme de l'affaissement des Spécimens du sol sableux remoulé. Il n'a conclu que le mécanisme dominant dans l'affaissement

Des sols sableux avec des fines étaient la désintégration des particules d'argile dépendant de la Quantité de cette dernière.

En se basant sur la recherche bibliographique on peut définir les structures suivantes :

1. Dans le cas où le sol est constitué par du sable et silt fin la résistance temporaire de ce sol est due à la tension capillaire. En effet, lorsque le sol est desséché en dessous de la limite déterrait l'eau reste se retire à l'intérieur des espaces étroites à proximité des jonctions des grains. L'interface air-eau, met l'eau sous tension capillaire. Ainsi, l'excès de pression interstitielle (u), dans l'expression usuelle de la contrainte effective : ($= \sigma - u$) devient négative et σ' dépasse la contrainte totale ($u > \sigma$) appliquée par les charges. Ceux-ci augmentent la résistance apparente du sol. Cependant, l'addition d'eau réduit considérablement cet effet avantageux et si le sol est poreux il peut venir une grande diminution de son volume.
2. Dans le cas des liaisons en argile, l'histoire de la formation du sol devient importante car des différents types d'arrangement des particules d'argile sont possibles. Lorsque l'argile provient d'une réaction entre le sol ou l'eau de pluie et le feldspath, l'un des
3. arrangements est de type parallèle confère au sol une résistance élevée à son état desséché. Une addition d'eau importante provoque la séparation des particules d'où un affaissement. lorsque la quantité d'eau de pluie n'est pas assez importante, il est possible que l'effet de séparation des particules soit faible et qu'un arrangement flocculent arc-bouté se crée autour des grains et développe, après évaporation de l'eau, une résistance appréciable.
4. Les agents de cimentation telle que l'oxyde de fer et le carbonate de calcium ont un effet de soudage des contacts entre les grains et fournissent une certaine résistance pour ces sol cette action de cimentation a été souvent observée dans les lœss. Quel que soit la nature de la liaison entre les grains des sols affaissables, ces dernières perdent leur résistance par addition d'eau.

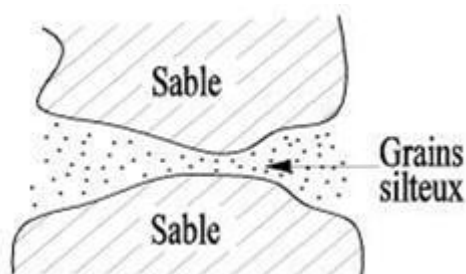


Figure I-3 : Liaison par silt.

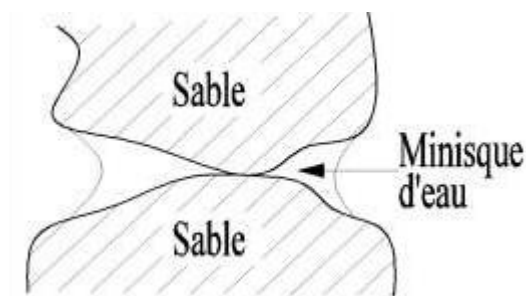


Figure I-4 : Liaison par tension capillaire

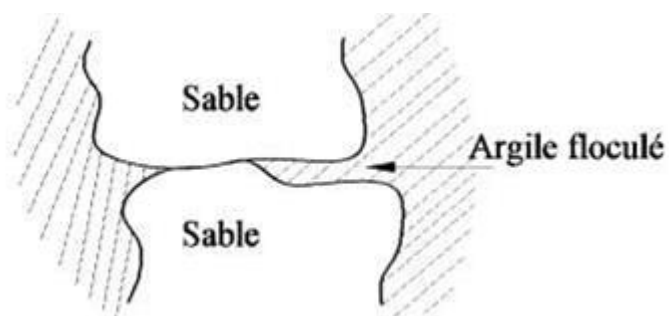


Figure I-5 : Liaison par de l'argile floculé.

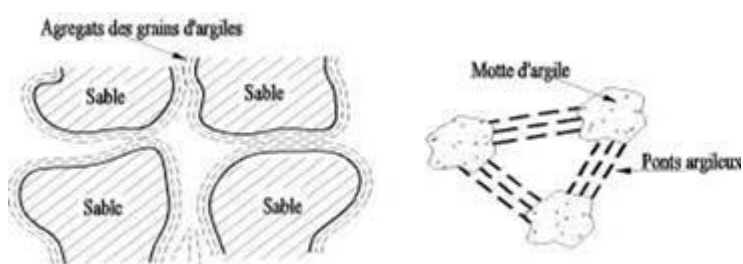


Figure I-6 : Liaison par des agrégats d'argile.

I-11-des méthode pour étude Les caractéristiques physique d'un sol

a- Essais Proctor

La teneur en eau d'un sol est un paramètre d'état fondamental et détermine son comportement. Pour réaliser un bon compactage de remblai, couche de forme ou corps de chaussée, nécessaire de déterminer la valeur en eau idéale du matériau permettant un compactage efficace aboutissant à la meilleure compacité. L'essai Proctor consiste à simuler le compactage en laboratoire pour déterminer les conditions optimales de mise en œuvre du matériau sur le chantier. L'énergie de compactage dépend de la destination de l'ouvrage. Elle est imposée par les C.C.T.P.

On distingue :

- L'essai Proctor normal : Énergie de compactage modérée pour remblais en terre (barrages en terre, digues,...)
- L'essai Proctor modifié : Énergie de compactage intense pour fondation de chaussées, pistes d'aérodromes, ...). Il correspond au compactage maximum que l'on peut obtenir sur les chantiers avec des engins de compactages puissants.

L'ingénieur américain Proctor a montré que pour une énergie de compactage donnée, la teneur en eau du matériau avait une grande influence sur la compacité obtenue. L'essai Proctor consiste à compacter dans un moule normalisé, avec une énergie de compactage normalisée (dame de masse normalisée tombant d'une hauteur constante), un échantillon du matériau à différentes valeurs de teneur en eau pour en déduire :

- La teneur en eau optimale : w_{OPN} (ou w_{OPM} suivant le cas).
- La densité sèche maximum correspondante γ_d (γ_{dOPN} ou γ_{dOPM})

b-Masse spécifique >s ou Masse volumique absolue d'un sol

➤ Mode opératoire

Utilisation d'une éprouvette

- placer l'éprouvette dans le bac en plastique
- verser de l'eau dans l'éprouvette (de mi-hauteur) et noter V1
- préparer un échantillon de granulats secs de masse M1 (environ 300 g)
- verser l'échantillon dans l'éprouvette à l'aide de l'entonnoir et provoquer le départ des vides (= air) en

Remuant le mélange avec la tige agitateur

- noter le nouveau volume d'eau dans l'éprouvette V2

- vider le granulat dans un bac en plastique et jeter son contenu dans la benne extérieure
- renouveler l'opération 2 fois

➤ **Utilisation d'un pycnomètre**

- verser de l'eau dans le pycnomètre jusqu'au trait repère et déterminer M1 (pycnomètre essuyé)
- vider une partie du pycnomètre et déterminer m2
- préparer un échantillon de granulats secs (50 g environ)
- verser l'échantillon dans le pycnomètre à l'aide de la main écope et provoquer le départ des vides (=air) en remuant le mélange avec la tige agitateur. Noter la nouvelle masse m'2
- compléter le niveau d'eau dans le pycnomètre jusqu'au trait repère. Noter la nouvelle masse M3
- vider le granulat dans un bac en plastique et jeter son contenu dans la benne extérieure
- renouveler l'opération 2 fois

➤ **Résultats**

Utilisation d'une éprouvette :

La masse spécifique = γ_s ou masse volumique absolue est donnée par:

M1

$\gamma_s = \frac{M}{V}$ en g/cm ou kg/dm ou t/m

$V_2 - V_1$

➤ **Utilisation d'un pycnomètre :**

On pose : $M_2 = m'_2 - m_2$ = masse de granulats secs introduits dans le pycnomètre

$M = M_1 + M_2 - M_3$ = masse de l'eau "supprimée" par l'introduction du granulat

La masse volumique de l'eau étant sensiblement égale à 1g/cm à température ambiante, on a : $V \approx M$

M2

$\gamma_s = \frac{M}{V}$ en g/cm ou kg/dm ou t/m

c-Limite d'Atterberg

En mécanique des sols, on distingue différentes classes de sols ; c'est ainsi, les sols pulvérulents sont les sables fins qui se présentent sous l'aspect de poudre. Les argiles par contre,

Se forment les pâtes dans lesquelles chaque grain est relié aux grains voisins par des forces de cohésions dues à la présence des couches absorbées.

On appelle cohésion, l'aptitude que possède le sol à maintenir ses grains reliés les uns aux autres. Les sols doués de cohésion sont appelés sols cohérents, on distingue le cas de l'argile. Les sols qui n'ont pas de cohésion ou qui ont très peu de cohésion entre les grains sont appelés grenus ou pulvérulents, on distingue le cas du sable.

Le comportement des sols pulvérulents est quasi- indépendant de leur teneur en eau. Ce dernier, par contre, joue un rôle fondamental dans le comportement des sols cohérents. Les sols cohérents auront une consistance liquide si la teneur de l'eau est élevée, pâtes si la teneur de l'eau est modérée, et solide si la teneur de l'eau est très faible.

- A l'état liquide, les grains de sol sont indépendants et ne se touchent pas. Leurs mouvements relatifs sont très aisés.
- A l'état plastique (pâtes) les grains sont rapprochés et ont mis en commun l'eau absorbée qui agit comme un sachet en plastique dans lequel les grains peuvent se mouvoir sans s'écarter.
- A l'état solide, les grains se sont encore plus près les uns des autres, ils arrivent même au contact en quelques points en chassant l'eau absorbée. Les frottements internes sont alors importants. Par humidification (augmentation de la teneur de l'eau) ou par séchage (diminution de la teneur de l'eau) le sol cohérent passera d'un état de consistance à un autre de manière progressive.

Néanmoins Atterberg, ingénieur agronome suédois, a défini en 1911, des teneurs en eau limites qui séparent le passage du sol d'un état de consistance à un autre. Ces teneurs en eau particulière sont appelées limites de consistance ou limites d'Atterberg.

La limite de liquidité notée WL :

Par définition, la limite de liquidité est la teneur en eau (exprimée en %) qui correspond à une fermeture en 25 chocs.

La limite de plasticité notée Wp :

Par définition, la limite de plasticité est la teneur en eau (exprimée en %) du fuseau qui se brise en petits tronçons de 1 à 2 cm de long au moment où son diamètre atteint 3 cm.

Ces teneurs en eau limites sont déterminées expérimentalement sur la fraction du sol (le mortier) qui passe au tamis 0,4 mm

On exprime l'étendue du domaine de plasticité, l'étendue des teneurs en eau pour lesquelles le sol garde une consistance plastique par un paramètre, l'indice de plasticité (I_p), cet indice

Marque l'étendue du domaine plastique, c'est-à-dire la différence entre la limite de liquidité et la limite de plasticité.

$$Ip = WL - Wp$$

- **Principe de détermination des limites de consistance :**
- **La limite de liquidité :**

La limite de liquidité se détermine en utilisant l'appareil de casa grande. On étend sur une coupelle une couche d'argile dans laquelle on trace une rainure au moyen d'un instrument en forme de V. on imprime à la coupelle des chocs semblables en comptant le nombre de chocs nécessaires pour fermer la rainure sur 1 cm, on mesure alors la teneur en eau de la pâte, bien entendu, tout l'appareillage est rigoureusement normalisé.

Toujours est – il que, l'expression a prouvé qu'il existe une relation entre le nombre de chocs N et la teneur en eau W. la représentation de cette relation est une droite en coordonnées semi- logarithmiques lorsque le nombre de chocs est compris entre 15 et 35. pour le même intervalles des valeurs de N, la formule suivante permet de déterminer la limite de liquidité à l'aide d'une ou deux mesures seulement.

$$WL = (N/25)^{0,121}$$

- **La limite de plasticité :**

Pour déterminer la limite de plasticité, on roule l'échantillon en forme de fuseau qu'on amincit progressivement. La limite de plasticité est la teneur en eau du fuseau qui se brise en petits tronçons de 1 à 2 cm de long au moment où son diamètre atteint 3 cm. On exécute en général, 2 essais pour déterminer cette limite.

- **indice de plasticité**

L'indice de plasticité I_p est la différence entre la limite de plasticité et la limite de liquidité, il mesure l'étendue du domaine de plasticité du sol. Il s'exprime donc par la relation :

$$Ip = WL - Wp$$

I-11-Méthodes De Traitement Des Sols Affaissables

Les sols affaissables en place est probablement très compressible, et de faible consistance. Après l'humidification dans le cas où le choix d'un autre site pour l'ouvrage est impossible, La solution possible reste la stabilisation du sol : c.à.d. l'amélioration des propriétés du sol. Plusieurs chercheurs se sont penchés sur le traitement des sols par affaissables des procédés qui soucieux de la sensibilité et de l'importance des constructions que l'on allait réaliser dessus à

Proximité, optent pour tel ou tel choix de méthode et qui le plus souvent obéissent à des contraintes technique et surtout économiques.

Pour le traitement des sols collapsables ou affaissables on utilise plusieurs méthodes qui dépendent essentiellement de la profondeur et de la capacité portante que requiert l'ouvrage. Comme les méthodes d'injection de liants (bitume, ciment, chaux, laitier), de pilonnage ou décongélation, relativement chers, d'autre part, les procédés de compactage mécaniques, c'est ce dernier groupe de procédé, principalement mis en œuvre sur les chantiers routiers.

a-Traitement par compactage

Le compactage est l'ensemble des opérations mécaniques (apport d'énergie mécanique), qui conduisent à accroître la densité d'un sol. En faisant, la texture du sol est resserrée ce qui réduit les déformations et tassements et augmente la compacité du sol et améliore sa capacité portante. Les ouvrages couramment concernés par le compactage sont les remblais routiers, les barrages en terre et les aérodrômes.

- La densification mécanique du sol peut entraîner.
- Modification de la granulométrie.
- Modification de la teneur en eau.
- Réduction ou élimination des risques de tassement.
- Augmentation de la résistance du sol et la stabilité du talus.
- Amélioration de la capacité portante.
- Limitation des variations de volume causées par gel, gonflement et retrait.

Il Ya trois type de compactage :

- une pression exercée par un rouleau compacteur.
- une masse qui chute sur une hauteur donnée.
- une vibration transmise par un moteur à pulsation hydraulique monté sur un compacteur (ou grue)
- (vibrocompactage).

b-Traitement par pré chargement

Le pré-chargement est une méthode d'amélioration des sols compressibles d'usage très courante en pratique. Lorsqu'il s'agit de construire sur un sol saturé de faible portance et (ou) relativement compressible le pré-chargement (généralement fait par un remblai) est la technique la plus simple qui permet d'assurer une amélioration de la résistance au cisaillement à court terme. Le pré-chargement par étapes, lorsqu'il s'agit d'édifier des remblais de grande

hauteur (>6m) sur une argile molle très compressible le chargement doit être fait par étapes pour éviter de provoquer la rupture par poinçonnement du sol.

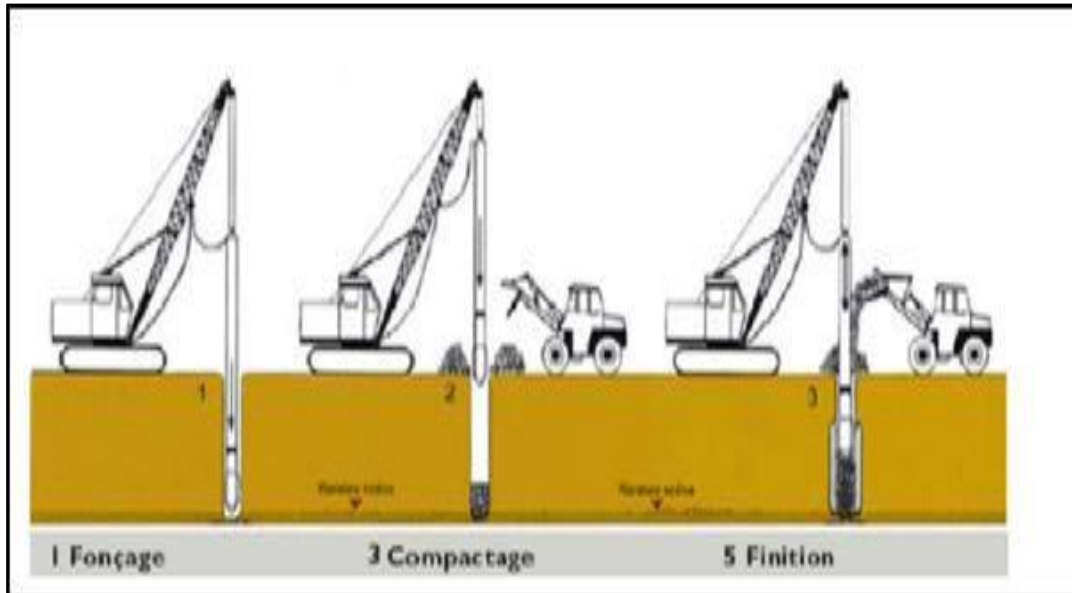


Figure I-7 : Principe de traitement par pré chargement.

c-Traitement par colonne ballastée :

Les colonnes ballastées, au sens le plus large de terme, ont été élaborées afin de permettre l'amélioration des sols de mauvaises qualités géotechniques. Le fait d'incorporer et de compacter un matériau ayant des caractéristiques géotechniques supérieures au sol en place entraîne un renforcement de ce dernier. Les différentes méthodes d'amélioration répondent à contraintes techniques liées aux caractéristiques géotechniques des sols en place.

Les objectifs généraux qui sont attendus d'une amélioration sont attendus d'amélioration de sols par inclusions souples sont :

- l'augmentation de la capacité portante du sol.
- l'augmentation de sa résistance au cisaillement.
- l'obtention d'un drainage radial efficace assurant la consolidation.

Les colonnes ballastées sont des colonnes constituées de matériaux granulaires, sans cohésion, mis en place par refoulement dans le sol et compactés par passes s

d-Compactage par explosifs

La consolidation par explosion, consiste à placer à une profondeur donnée une charge telle qu'il n'y ait pas de cratère en surface. La présence de gaz occlus dans le sol consolidé, indispensable, influence l'efficacité du phénomène. Il s'agit d'une solution brutales simple, ne

nécessitant pas de gros investissement pour le compactage rapide de grandes masses de sols non cohérents lieux suffisamment éloignés de toute agglomération. La quantité d'explosifs varie de 10 à 30 kg/m³ de sol traité .Cette consolidation par explosion a été surtout employée en ex URSS dans les sables non cohérents et les lèss.

e-Vibrocompacta

Inventé en 1934 en Allemagne par Stuhmann et Dégel, c'est le procédé équiper et d'exécuter le compactage en profondeur du sol en place, à l'aide d'une aiguille vibrante par ajout ou non d'un matériau pulvérulent. Sous l'effet simultané des vibrations et de saturation, les grains des sables lâches son réarrangés à un état compact duquel résulte une augmentation de la contrainte latérale. Le vibrocompactage est très recommandé pour les sables moyens à gros dont la granulométrie montre un pourcentage en poids de tamisât (à travers le tamis d'ouverture 0,0074mm) en limon inférieur à 12% et un pourcentage en poids d'argile inférieur à 2%). Le vibrocompactage est exécuté sur une profondeur variant de 3 m à 56 m, selon des mailles où la distance entre les points de traitement varie de 1m à 5m. La performance du vibrocompactage est d'atteindra généralement une densité relative du sol amélioré qui varie de 75% à 100% selon le projet



Fig I-8 : Compactage par vibor-sonde

f-Traitement par substitution

Parfois on recourt à la substitution, soit par ajout d'un sol de bonne qualité après décapage du sol existant, soit par reconstitution du sol existant avec un autre sol de qualité meilleure avec succès en Algérie dans un projet d'une station de carburant à Hassid. Dans les deux cas un compactage poussé doit être appliqué. Cette technique a été appliquée (Rame rapports technique 1990). Elle requiert des moyens logistiques et la disponibilité du sol de substitution dans une zone bien proche pour diminuer les coûts. À défaut, on pourrait utiliser le même sol excavé puis remis en place après traitement avec du ciment tout en diminuant la quantité d'eau et l'énergie de compactage suivant les proportions suggérées

Par Aydat et Gherabli (1995).

g-Traitement thermique

Destinée aux ouvrages importants, d'après séleucide technique LCPC/SETR (2000), cette méthode de traitement a été procurée pour la première fois par Ostasheven 1934. Consiste à soumettre le sol à un réchauffement contrôlé, on injecte dans le sol pendant plusieurs jours de l'air ou du gaz chauffé entre 200 et 800°C, ce qui fait fondre le squelette du sol et les contacts entre les particules sont soudés. Le sol devient presque insensible aux phénomènes de gonflement et retrait cependant le coût du transport et de mise en place des unités mobiles de traitement peut être très lourd et n'est rentable, en terme strictement financier, que lorsque les quantités de sol à traiter sont importantes.

h-Traitement par injection

Par l'intermédiaire de forages, on introduit dans les vides du sol un produit liquide (coulis) se rigidifiant par la suite, l'injection du coulis est amenée en profondeur du sol par l'intermédiaire d'un tube de diamètre compris entre 25 et 50 mm, souvent en matière plastique. Le tube est scellé au terrain par une gaine en coulis argile-ciment tous les 30 cm, le tube est percé de trous, lesquels sont couverts d'une manchette, en caoutchouc. Un train de tiges, creux, muni à son extrémité d'un double obturateur, permet d'envoyer les coulis dans les endroits des couches à traiter, par tranches de 30 cm. le coulis est envoyé sous pression pour composer les diverses pertes des charges (train de tiges, obturateur, manchette, gaines). On commence généralement par le fond et on retire le train de tiges au fur et à mesure de l'injection

Les coulis utilisés sont généralement des suspensions stables à base de ciment. Retraitement au ciment convient plus particulièrement aux sols peu plastiques, qui sont a priori au traitement à la chaux du fait de leur faible teneur en argile, auxquelles il apporte cohésion, résistance mécanique, stabilité à l'eau et au gel. la prise au ciment est plus rapide que celle de la chaux (qui évolue encore au bout d'un an les constituants hydratés du ciment relient les grains de sable entre eux en formant des sortes de ponts nombreux et solides, d'où l'augmentation de la portance et de la résistance mécanique. On utilise des ciments de classe 45 qui sont les meilleurs marchés. Les doses varient de 3,5 à 5 % du poids de sol sec traité. Marquons aussi d'autres types de traitement en bentonite et en résines.

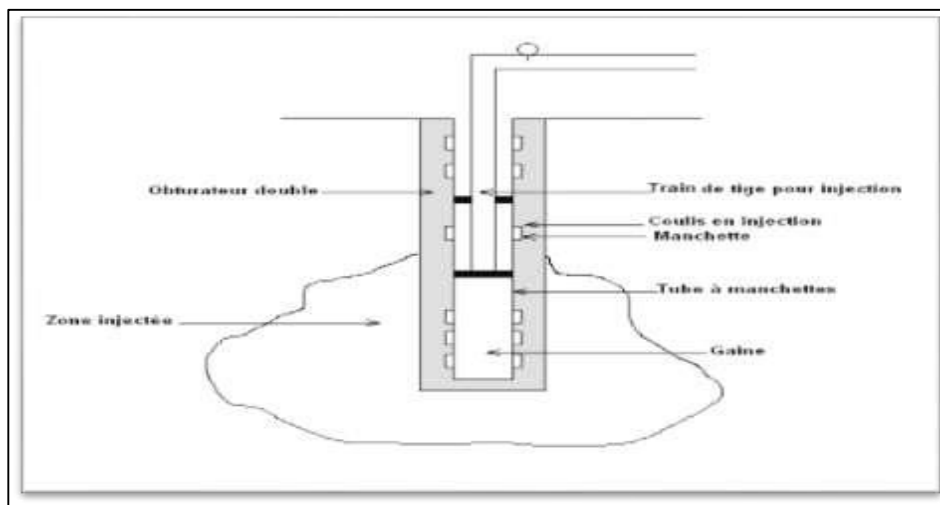


Figure I-9 : Traitement par injection

i-Traitement chimique

Par malaxage ou injection de produits chimiques dans le sol tels que ciment portland, chaux, asphalte, chlorure de calcium ou de sodium, résidus de pâtes et papiers. il existe trois (03) types de traitement chimiques courant :

- 1- Traitement à la chaux.
- 2- Traitement au ciment.
- 3- Les colonnes de sol traité.

Elles permettent de mettre en œuvre et de compacter les sols mouillés qui, normalement ne pourraient pas être compactés correctement.

L'incorporation de la chaux génère immédiatement la formation d'une masse granuleuse, et a pour effet de réduire le taux d'humidité. ce procédé convient par exemple pour la réalisation de remblais, de talus ou de voies de circulation sur le chantier. Cette technique de stabilisation au ciment a pour effet de rendre les sols plus résistants contre les sollicitations causées par la circulation et les facteurs climatiques.



Figure I-10 : Traitement chimique à la chaux et au ciment

1-Traitement par drains verticaux (DV)

Le drainage vertical est une technique complémentaire des techniques de rechargements. Il permet une consolidation plus rapide du sol. Les drains verticaux sont utilisés pour l'amélioration des sols fins saturés en eau (terrains silt eux ou argileux). La Technique consiste à verticalement dans le terrain, suivant un maillage régulier, un drain préfabriqué. Lors de la mise en charge du terrain, les drains facilitent l'évacuation d'eau interstitielle jusqu'à la surface, permettant ainsi une consolidation accélérée des sols traités. La surcharge est apportée soit par un remblai de pré chargement, soit par d'autres méthodes. Les drains verticaux en plastique souple plats ou cylindriques, peuvent atteindre des profondeurs de 40 m ou plus. Selon la nature et la composition des terrains, les drains peuvent être également réalisés sous forme de colonnes de sable ou de granulats. Il y a deux familles de drains à savoir Magnan (1983).

- Les drains préfabriqués (DVP) sont d'exécution rapide et permettent d'accélérer fortement la consolidation.
- Les drains de sable contribuent à une réduction du tassement et offrent souvent une marge de profondeur variable, qu'il n'est pas possible de réaliser avec des drains préfabriqués.

I-12- Le choix basé sur classes granulométriques et l'état du sol :

La Figure (I.17) les domaines d'utilisation des différentes méthodes d'amélioration des sols, par référence aux classes granulométriques et à l'état du sol, représenté par sa résistance de corneau pénétromètre statique.

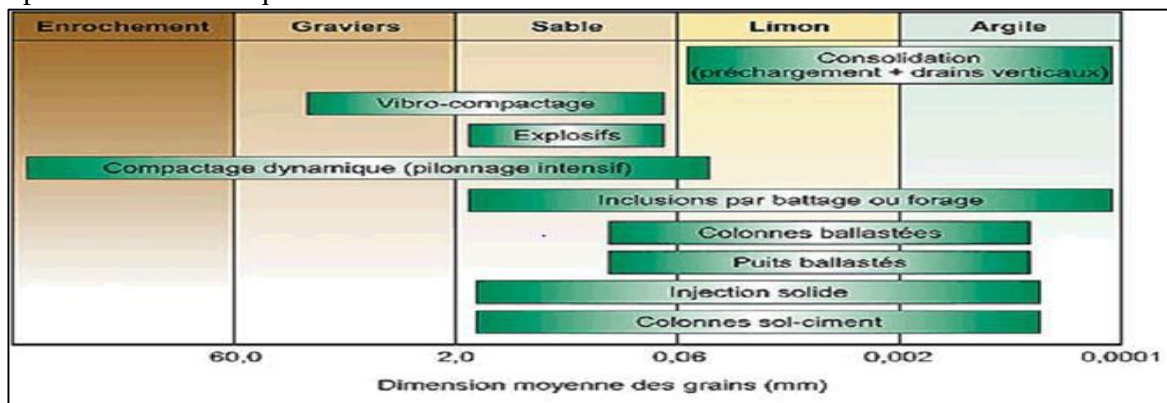


Fig. I.10 : Les champs d'application des différentes techniques de traitement.

I-13 : Les Méthodes Prédictives D'affaissement :

Pour une meilleure évaluation des propriétés de sol susceptibles d'affaissement, différentes méthodes ont été adoptées par plusieurs chercheurs. Ces méthodes sont comme suit :

a- Méthodes empiriques

DENISOV (1951) : [10]

$$K = e_1/e_0$$

Ou :

e_0 : l'indice des vides.

e_1 : l'indice des vides à la limite de liquidité.

K : coefficient de tassement.

Si :

$K = 0.50$ à 0.75 : sol à affaissement important.

$K = 1.00$: sol à affaissement faible.

$K = 1.50$ à 2.00 : sol non affaissable.

➤ **FEDA (1966)** : [11]

Si : $n_0 \geq 40\%$

-sol Affaissable

Où n_0 : porosité du sol.

➤ **HANDY (1973)** :

Teneur en argile ($< 0,02\text{mm}$)

Si :

$T_A < 16\%$ - Affaissabilité très probable.

D 16 à 24 % - Affaissabilité probable.

De 24 à 32 % - Affaissabilité probable à moins de 50 %.

> 32 % - pas d'affaissement.

❖ **AYADAT et BELOUAHRI (1996)** :

$U \leq 4$ - pas d'affaissement.

$4 < U < 12$ - l'affaissement est probable.

$U \geq 12$ - l'affaissement est très susceptible.

Où

U : coefficient d'uniformité.

CHAPITRE II
PROGRAMME
EXPERIMENTAL ET
PROCEDURES D'ESSAIS

CHAPITRE II

PROGRAMME EXPERIMENTAL ET PROCEDURES D'ESSAIS

I- INTRODUCTION

Ce deuxième chapitre va comporter les caractéristiques des matériaux utilisés dans la préparation des échantillons de sol, puis le programme d'essais exécutés. Ce dernier va comporter des essais définissant les caractéristiques physique chimique et minéralogique des sols affaissables non traités puis de les caractéristiques physique de ceux traité afin de mettre en évidence l'influence du traitement sur un sol affaissable, les modes opératoires de ces différents essais sont décrits dans ce qui suit.

II- MATERIAUX UTILISE :

Les essais sont effectués sur un sol reconstitué composé de kaolin et de sable.

II-1 -le kaolin

Le kaolin est une argile blanche, friable et réfractaire, composée principalement de kaolinite, soit des silicates d'aluminium. Découverts à l'origine en Chine, ils sont à la base de la fabrication de la porcelaine, mais sont surtout utilisés pour l'industrie du papier. Le kaolin utilisé dans ce travail ($<80\mu\text{m}$), est extrait de la mine de la région de Mila.



Figure (II-1) :le kaolin

II-2-Le déchet de verre

Le traitement des échantillons de sol reconstitués au laboratoire va être fait avec des déchets de verre présenté sous forme de fibre de verre moulue dont l'image est donnée ci-dessous.



Figure (II-2) : La fibre de verre**II.3 . le sable**

Le sable utilisé pour la reconstitution de notre sol est extrait d'oued Maitar, région de Boussaâda dans la wilaya de M'sila, très utilisé pour la confection du béton dans les chantiers. Après son passage à l'étuvage (105°C) pendant 24heurs on a procédé au tamisage (2mm) les refus sont rejetés, les particules inférieures à 2mm sont récupérées.

**Figure (II-3) : le sable****II.4 . Le sol reconstitué**

Pour la reconstitution des sols affaissables on utilise deux matériaux principaux :

- Le sable ($D < 2 \text{ mm}$).
- Argile ($D < 0.080 \text{ mm}$)

Le sol reconstitué est obtenu en mélangeant les deux matériaux : sable (80%) et argile (20%).



Figure (II-4) : le sol reconstitué

II.5. Détermination des propriétés physiques des sols étudiés

Des essais normalisés ont été effectués sur les différents sols, pour pouvoir connaître les caractéristiques physiques de ces derniers.

a- Analyse granulométrique :

Pour tracer les courbes granulométriques, on a effectué une analyse granulométrique par tamisage pour les grains supérieurs à $80\mu\text{m}$ (NFP 94-056 \ 1996), par contre pour ceux qui ont un diamètre inférieur à $80\mu\text{m}$ une méthode par sédimentation a été effectuée (94-057 \ 1992)

- *Principe de l'essai*

L'essai consiste à classer les différents grains constituant l'échantillon en utilisant une série de tamis, emboîtés les uns dans 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.

- *Appareillage*

- Une colonne de tamis propres et secs dont l'ouverture intérieure des mailles est respectivement de haut en bas (5 – 2 – 1 – 0.5 – 0.2 - 0.1 – 0.08) la colonne se termine par un fond pour recueillir les éléments passant au dernier tamis et un couvercle pour éviter la dispersion des poussières.
- Une tamiseuse mécanique.
- Une balance de précision : force de 4 à 5kg.
- Un pinceau souple de nettoyage des tamis.



Figure (II.5) Batterie et serie de tamis

➤ **Mode opératoire**

On procède suivant le mode suivant

- Prélever 1,5 kg de matériau sec.
- Verser le matériau sur la colonne et la fixer soigneusement sur la tamiseuse.
- Agiter pendant cinq minutes.
- Peser chacun des tamis et porter les résultats sur la feuille de calcul. Les résultats sont tracés sur un repère semi logarithmique, la courbe obtenue est appelée courbe granulométrique.

Les résultats sont tracés sur un repère semi logarithmique, la courbe obtenue est appelée courbe Granulométrique

b- Analyse Sédimentométrie

La sédimentométrie est un essai qui complète l'analyse granulométrique. Elle s'applique aux éléments fins inférieurs à 0.08mm. Les grains de diamètre différent sédimentent dans un milieu liquide au repos, à vitesse différente, la relation entre le diamètre des grains et la vitesse de sédimentation est donnée par la loi de Stokes. Comme cette relation a été établie pour les grains sphériques, en l'appliquant au sol on n'obtiendra que " Les diamètres équivalents".

❖ **Appareillage spécifique :**

- un densimètre gradué de 0.995 à 1.030g/cm³.
- Deux éprouvettes de 1 litre de contenance, de 85mm de diamètre et de 450mm de hauteur de graduation.
- Un agitateur mécanique dont la vitesse de rotation varie de 0 à 10000 tr /min.
- un dé flocculant : hexam et a phosphate de sodium.
- Un agitateur manuel pour l'homogénéisation de la suspension avant essai.

❖ **Appareillage courant :**

- un thermomètre gradué de 0 à 50°C.
- Un chronomètre.
- eau déminéralisée (distillé).
- une balance ; précise au décigramme.
- Un tamis de 0,08 mm.
- Un mortier avec pilon en caoutchouc.
- Une étuve de dessiccation avec thermostat 105°C.

❖ **Mode opératoire**1) **Préparation de l'échantillon :**

- ✓ On prend 80g de matériau sec (sol) pour une éprouvette de 2 litres.
- ✓ On met à imbiber les 80 g de matériau sec dans le récipient de l'agitateur mécanique. Cette imbibition doit être faite au moins 12 h à 15 h avant la dispersion à l'agitateur mécanique en utilisant environ 500 cm d'eau distillé additionnée de 60 cm d'hexam et a phosphate de sodium concentré à 5% dont la durée de vie de la solution ne dépasse pas un mois.
- ✓ L'agitateur mécanique qui doit séparer convenablement les grains doit être fait pendant 3 minutes à 10000 à 12000 trs/min.
- ✓ On verse la suspension dispersée dans l'éprouvette de 2 litres et on rince soigneusement le récipient de l'agitateur mécanique, puis on complète par l'eau distillé à 2 litres exactement.

2) **Exécution de l'essai :**

Avant de plonger le densimètre, agiter vigoureusement la suspension pour obtenir une concentration uniforme sur toute la hauteur de l'éprouvette. Retirer l'agitateur et déclencher au même moment le chronomètre, puis plonger lentement le densimètre, faire les lectures au sommet du ménisque. Noter le nombre R lu à partir de la graduation 1000 affecté du signe (+) pour les lectures supérieures à 1000. Les lectures sont faites à : 30s ; 1 min ; 2 min ; 5 min ; 10 min ; 20

min ; 30 min ; 60 min ; 120 min ; 240 min et 1440 min soit 24h ces temps sont comptés à partir du début de l'essai. Les trois premières lectures (à 30 sec ; 1 min ; 2 min) se font sans retirer le densimètre de la suspension, après la lecture à 2 min, on relève la température de la suspension au 1 / 10 de degré près. Pour les autres lectures, plonger le densimètre 15 à 20 secondes avant la lecture. Noter la température après chaque lecture. Les résultats trouvés à partir de cet essai vont servir à compléter la courbe granulométrique.

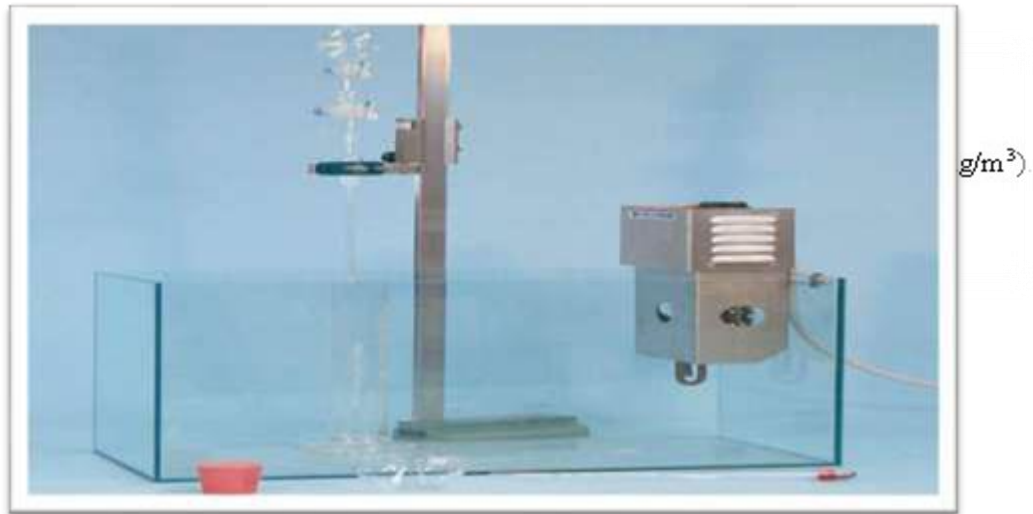


Figure II-4 : Appareillage de sédimentométrie.

IV : Masse volumique apparente et spécifique :

a- Masse volumique apparente

C'est la masse de l'unité de volume apparent du corps, c'est-à-dire du volume constitué par la matière du corps et les vides qu'elle contient.

❖ Principe

Remplir une mesure de 1 dm³, et en déterminer la masse.

- La masse volumique apparente est donnée par :

$$\text{Masse volumique apparent} = \text{masse/volume}$$

❖ **Appareillage :**

- Un entonnoir monté sur trépied.
- Un récipient calibré.
- Une règle à araser.
- Une balance de précision : force de 4 à 5 kg sensibilités 1 à 2 cg.



Figure (II-6): entonnoire trépied.

IV-2 : Masse volumique absolue :

La masse volumique absolue ρ_s est la masse par unité de volume de la matière qui constitue le granulat, sans tenir compte des vides pouvant exister dans ou entre des grains.

☒ Appareillage :

- 03 Pycnomètre en verre de 100 cm³
- Une balance de précision : portance de 4 à 5 kg, sensibilités 1 à 2 cg.
- Un entonnoir à long col.
- Tige en verre pour l'agitation.



Figure(II-7) : Pycnomètre en verre de 50cm³



Figure(II-8) : une balance

☒ Mode opératoire :

- Préparer un échantillon de sable, séché à l'étuve et refroidi.
- Peser le pycnomètre vide (sec et propre) M_0 .
- Dévisser le couvercle et introduire 30 g du matériau, peser l'ensemble, soit M_1 .
- Remplir la bouteille à moitié avec de l'eau et remuer énergiquement avec la tige en verre pour chasser les bulles d'air.
- Ajouter de l'eau jusqu'à 2 cm du bord supérieur, visser à fond le couvercle et Remplir à l'aide d'une pissette par le trou supérieur.
- Secouer le pycnomètre en rebouchant avec un doigt le trou du couvercle. Laisser Reposer un bon moment.
- Sécher les parois extérieures du pycnomètre et peser l'ensemble, soit M_2 .
- Vider le pycnomètre, laver et le remplir d'eau jusqu'au niveau du trou supérieur.

- Sécher les parois extérieures du pycnomètre et peser l'ensemble, soit M_3 .
- Reprendre mêmes étapes pour deux autres échantillons non utilisés.

☒ *Exploitation des resultants*

❖ *Le calcul de la densité des grains solides du sol est donnée directement par la*

Formule : $\gamma_s = (M_1 - M_0) / (M_3 - M_0) - (M_2 - M_1) \text{ g/cm}^3$.

V- Equivalent de sable

☒ *Principe de l'essai*

L'essai consiste à verser un échantillon de sable et une petite quantité de solution flocculant dans un cylindre gradué et d'agiter de façon à détacher les revêtements argileux des particules de sable de l'échantillon. On remplit alors le tube en utilisant le reste de la solution flocculant afin de faire remonter les particules de fines en suspension au-dessus du sable. Après 20min, les hauteurs des produits sont mesurées. L'équivalent de sable est le rapport hauteur du sable sur hauteur totale.

❖ *Appareillage utilisés*

- Une balance.
- Un Tamis 5mm.
- Trois éprouvettes cylindriques transparentes en matière plastique, chacune est graduée en 2/10 de centimètre à partir de la base jusqu'à 38cm.
- Un entonnoir pour verser l'échantillon dans l'éprouvette.
- Un chronomètre.
- Un agitateur mécanique de course 25cm.
- Un bouchon en caoutchouc permettant de fermer l'éprouvette.
- Une règle.
- Un piston taré en métal inoxydable.
- Un flacon de 5 litres placé à 1m environ au-dessus de la table de travail contenant la solution normalisée, et muni d'un système de siphon.

- Un tube laveur relié au flacon par un tube caoutchouc muni d'une pince pour sa fermeture, La quantité de sable nécessaire pour cet essai est : $m=120g$

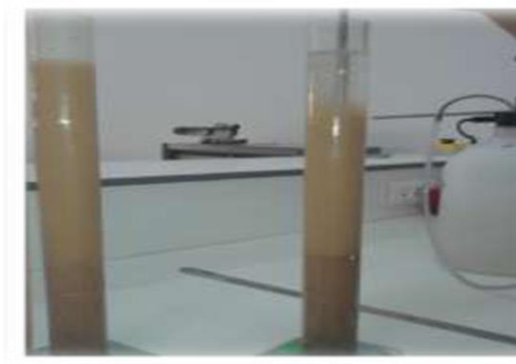
☒ Mode opératoire

- Prendre 500gr de l'échantillon de sable passant au tamis 5mm.
- Dans une éprouvette graduée, siphonner la solution lavant jusqu'à une hauteur de 10cm.
- Verser soigneusement une mesure de 120 gr de l'échantillon, à l'aide de l'entonnoir, dans l'éprouvette placer verticalement.
- Taper à plusieurs reprises la base de l'éprouvette cylindrique fortement sur la paume de la main pour déloger les bulles d'air et favoriser un bon mouillage de l'échantillon, laisser reposer 10 minutes.
- Boucher l'éprouvette à l'aide du bouchon de caoutchouc, la secouer horizontalement 90 fois aller-retour en 30secondes avec une course d'environ 20 cm. En suite placer l'éprouvette verticalement.
- Oter le bouchon de caoutchouc et le rincer au-dessus de l'éprouvette avec la solution lavant, réglée à un 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.
- Arrêter les l'écoulement lorsque le niveau du liquide atteint le repère supérieur 38 cm ; relever ensuite lentement le tube laveur.
- Laisser reposer, sans perturbation, pendant 20 minutes.
- Au bout de ces 20 minutes mesurer h_1 , h_2 , h'_2
 - h_1** : hauteur du sable.
 - h_2** : hauteur du sable +éléments fins.
 - h'_2** : hauteur des éléments fins pris à partir du piston.

L'équivalent de sable et déterminer par :

✓ $E_s \text{ (piston)} : (h'2/h1) \times 100.$

✓ $E_s \text{ (visuel)} : (h2/h1) \times 100.$



Figure(1I-9) : ensemble complet pour équivalent de sable.

VIII-Essai de bleu de méthylène : NF P 94-068

a-Principe de l'essai l

Il consiste à déterminer la capacité d'adsorption ionique d'un sol en mesurant la quantité de colorant de bleu de méthylène nécessaire pour recouvrir la surface totale, externe et interne, de toutes les particules argileuses présentes dans la solution à étudier par une monocouche de bleu de méthylène. On appelle cette quantité, la valeur au bleu, notée VB et exprimée en grammes de bleu par grammes de sol, tel que montre l'équation :

$VB = VBM / M_{sol}$ où : VBM est la quantité de bleu de méthylène adsorbé (ml), et M_{sol} masse sol sec de la prise d'essai (g).

☒ **Matériel nécessaire**

- Une balance permettant de faire toutes les pesées.
- Un chronomètre, un papier filtre, une baguette de verre.
- Un agitateur à ailettes.
- Un bécher de 1 ou 2 litres en matière plastique.
- Une étuve ventilée ou autre moyen séchage.
- Bleu de méthylène à 10g /l avec doseur permettant des injections de 2.5 ml et 10ml.
- Un chronomètre.



Figure (II-10) : Appareillage de l'essai de bleu.

VIII-2 : Préparation de l'échantillon

L'essai est effectué sur la fraction granulométrique 0/5mm du matériau, car ce sont principalement les éléments les plus fins (inférieurs à 2mm) qui contiennent la fraction argileuse. Celle-ci donne l'essentiel de la réaction au bleu de méthylène et exprime donc de manière quantifiée la sensibilité du sol à l'eau.

On prépare 30g de fraction 0/5 mm sèche que l'on met à tremper dans 200 ml d'eau déminéralisée. Le tout est maintenu en agitation permanente au moyen de l'agitateur à ailettes.

Le dosage consiste à injecter successivement des doses bien déterminées de bleu de méthylène dans la suspension de sol, jusqu'à atteindre la saturation des particules d'argile. Le test

de la tache permet de repérer l'instant de cette saturation.

On prélève une goutte de liquide dans le bêcher contenant le sol imbibé de bleu, et on dépose celle-ci sur le papier filtre (diamètre du dépôt compris entre 8 et 12 mm). Deux cas sont possibles :

- La goutte centrale bleue est entourée d'une zone humide incolore: le test est négatif,
- La goutte centrale bleue est entourée d'une zone humide teintée de bleu : le test est positif.

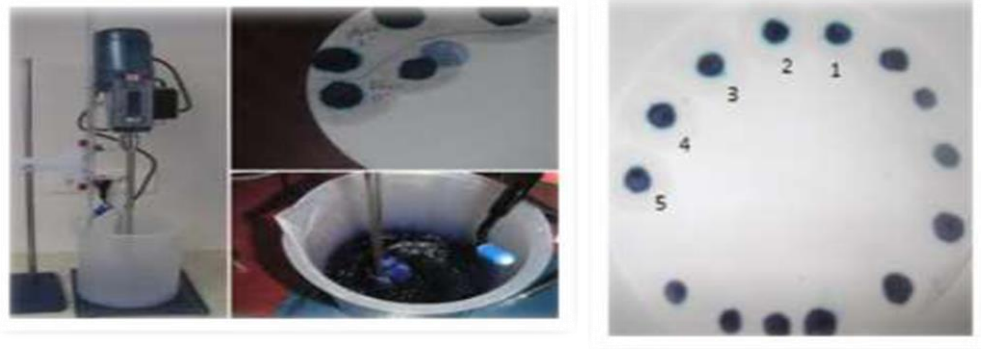


Figure (II-11) : les taches sur un papier filtrant.

VI-Limites d'Atterberg (NF P 94-051\ 1993):

Cet essai se pratique sur la fraction de sol dont les particules ont une dimension inférieure à 0,42 mm (le mortier). Par définition, la teneur en eau w d'un sol est le rapport entre le poids d'eau W_w et le poids de sol sec W_s . Elle est exprimée en %. En 1905, Atterberg a défini des teneurs en eau fixant les limites entre les 3 états. Si à un échantillon de sol préalablement desséché et pulvérisé, on fait croître la teneur en eau de façon homogène par malaxage, il passe progressivement de l'état solide, à l'état plastique puis à l'état liquide

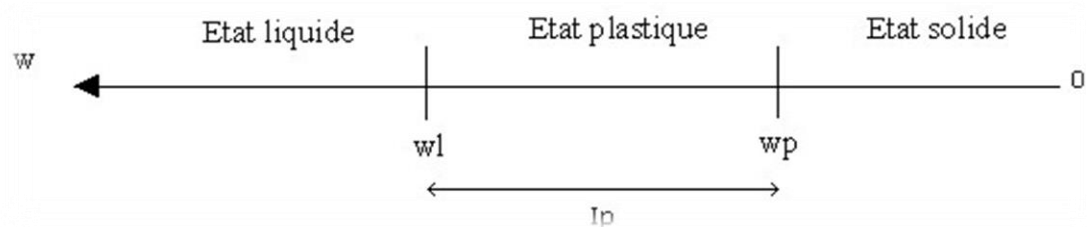


Figure (II-11) : Représentation des limites d'Atterberg.

a- La limite de liquidité WL

Le mortier est placé dans une coupelle et est séparé en 2 parties par une rainure. Des coups secs sont imprimés à la coupelle avec un appareillage spécial. Par définition, la limite de liquidité est la teneur en eau pour laquelle les deux lèvres de la rainure se rejoignent sur une longueur supérieure à 1 cm pour un nombre de coups donnés à la coupelle égale à 25.

b- La limite de Plasticité WP

C'est la teneur en eau au-dessous de laquelle il n'est plus possible de confectionner des boudins de sol de 3 mm de Ø sans qu'ils se rompent ou s'émiettent.

c- L'indice de plasticité IP

Il donne l'étendue du domaine plastique $I_p = W_L - W_P$. La plasticité d'un sol (c'est-à-dire sa faculté de devenir très déformable en absorbant de l'eau) est appréciée par le couple (W_L, I_p) qui dépendent de la nature des minéraux argileux contenus dans le sol et de leur quantité. C'est ainsi que Casagrande a défini un diagramme dit "Abaque de plasticité de Casagrande" qui permet de classer les sols fins.

d- Appareillage**1) Équipements nécessaires pour la détermination de la limite de liquidité « wL » :**

- ✓ Appareil de Casagrande : coupelle métallique, qui tombe de 10 mm sur un bloc en bois bakélite de dureté bien déterminée (**Figure : 8**).
- ✓ l'outil à rainure : permet de faire dans la moitié placée dans la coupelle, une rainure de forme et dimensions bien définies.
- ✓ Une étuve de dessiccation.
- ✓ Une balance.
- ✓ Des capsules ou boîtes de pétri, spatule, truelles.



Figure(II.13): Appareille de Casagrande

2) Équipements nécessaires pour la détermination de la limite de plasticité « WP» :

- ❖ Une plaque lisse en marbre ou un matériau équivalent pour le malaxage et la confection des rouleaux de sol.
- ❖ Des capsules ou boîtes de pétri, spatule, truelles.
- ❖ Une étuve de dessiccation.
- ❖ Une balance.
- ❖ Une plaque de verre de 5 cm de largeur et de 10.5 cm de longueur portant une graduation tous les 1 cm et une cal de 0.5 m.



Figure (II-14) : les étapes de la limite de plasticité

VII-Essai Proctor (NF P 94-093 \ 1999)

a- Principe de l'essai de compactage

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

La figure suivante illustre la courbe de Proctor :

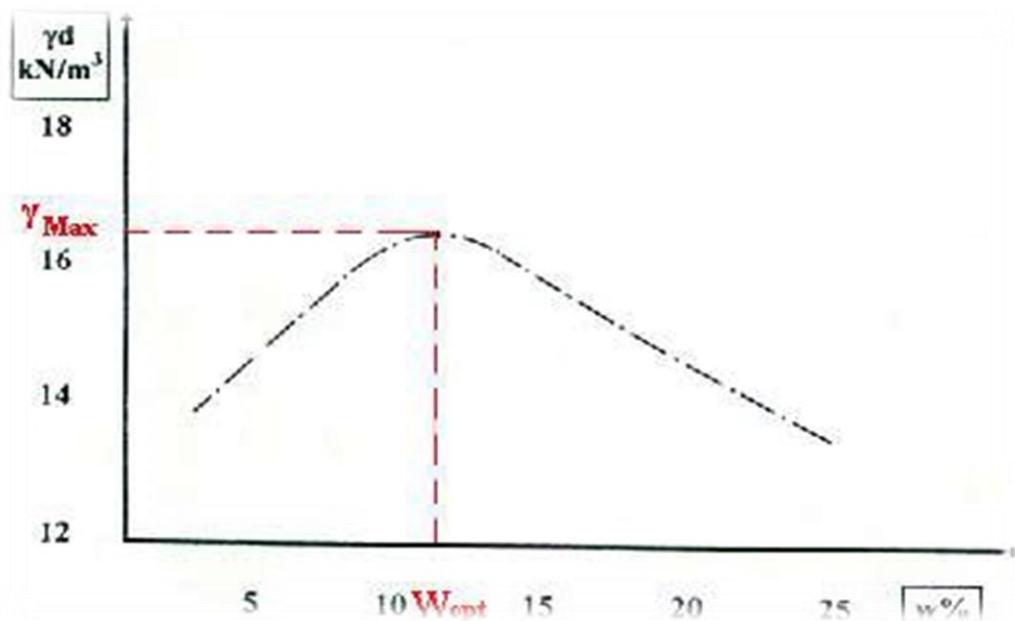


figure (II-14) : Courbe de Proctor.

L'énergie de compactage est égale à :

$E_c = \text{hauteur de chute} \times \text{poids de la dame} \times \text{Nb de coups} \times \text{Nb de couches} / \text{volume total du moule}.$

VII-1-a : Appareillage spécifique :

L'appareillage spécifique comporte :

- ✓ Un socle de compactage constitué d'un bloc de béton présentant une surface plane horizontale d'au moins 30 cm × 30 cm et une épaisseur d'au moins 30 cm.
- ✓ Le moule Proctor normal constitués d'un corps de moule, d'une embase et d'une rehausse. Le corps de moule peut être monobloc ou fendu.
- ✓ Une dame de compactage manuel «dame Proctor normal» constituée d'un mouton cylindrique de 51 mm ± 1 mm de diamètre. Ce mouton coulisse dans un fourreau qui lui autorise une hauteur de chute de 305 mm ± 2 mm. La masse de l'équipage mobile est de 2 490 g±2,5g.
- ✓ Une règle à araser constituée par une lame en acier.

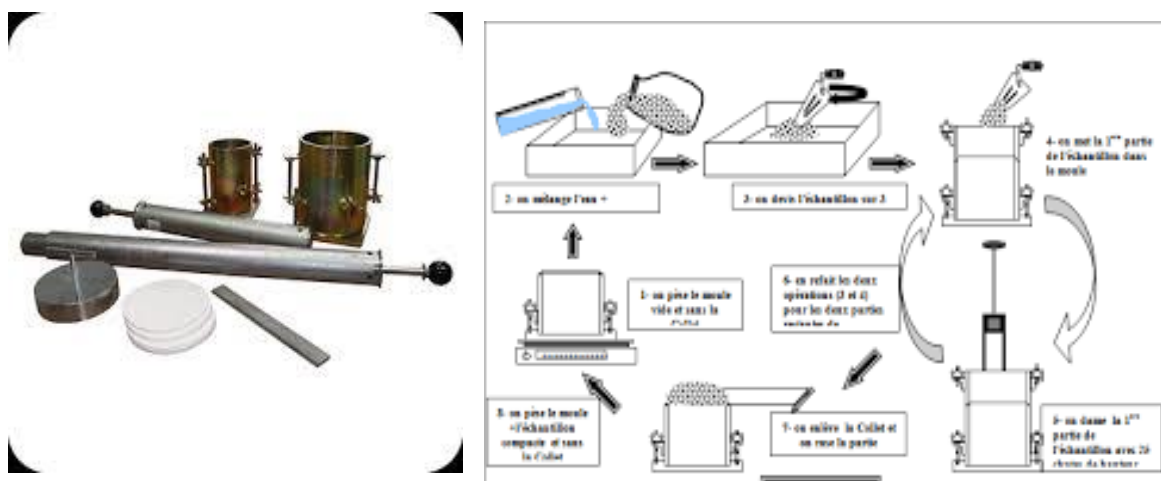


Figure (II-16) : Appareillage spécifique pour essais de compactage (Proctor Normal).

☒ Mode opératoire :

Préparation du matériau :

- Prendre 3 kg du matériau.
- Humidifier soigneusement le matériau ainsi préparé à la teneur en eau désiré.
- L'homogénéiser à la truelle, puis en le malaxant à la main ou dans un malaxeur.
- Fixer la hausse sur le moule. Lubrifier l'intérieur du moule et celui de la hausse.
- Mettre une quantité de matériaux dans le moule, suffisante pour qu'une fois compactée chacune des couches ait sensiblement la même épaisseur (la dernière couche devant avoir sa face supérieure au-dessus du niveau supérieur du moule, c'est-à-dire à l'intérieur de la hausse).
- Compacter chaque couche à l'aide de dame de compactage en 25 coups. S'arranger pour que le compactage soit uniforme.
- Une fois les trois couches compactées, enlever la hausse avec beaucoup de soin afin d'éviter la rupture de l'échantillon.
- Araser le moule à l'aide de règle.
- Nettoyer l'extérieur du moule à l'aide d'un pinceau.
- Peser le moule : on obtient le poids total humide.
- Enlever la base du moule.
- Prélever deux échantillon à la partie supérieure et à la partie inférieure du moule, et effectuer les mesure de la teneur en eau (passage à l'étuve à 105° pendant 24 heures).
- démonter le moule, et enlever le matériau humide, et malaxer une quantité de matériau et rajouter de l'eau pour obtenir une teneur en eau supérieure (+2). Effectuer un autre assai.
- Arrêter l'essai quand on obtient par deux fois consécutives une diminution du poids total humide par rapport à l'essai précédent.

VIII : Limite de liquidité--- Méthode du cône de pénétration

a- principe de l'essai

L'essai consiste à mesurer, après un temps fixé, l'enfoncement d'un cône, sous son propre poids, dans un échantillon de sol remanié (voir figure 1)

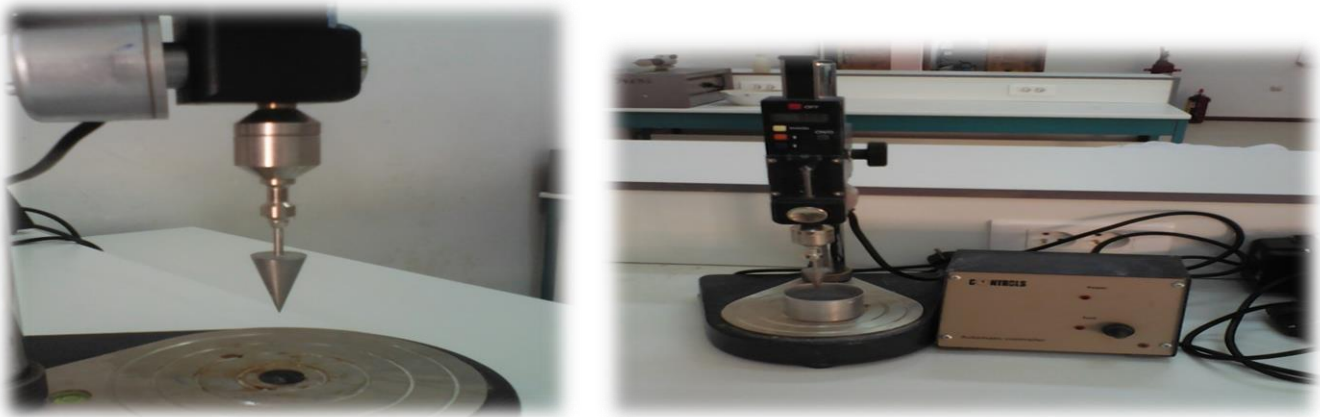


Figure (II-17) : Le cône de pénétration

b-Appareillage

a-1-Matériel pour la pénétration de sol

- Une étuve de dessiccation : une enceinte thermique ou une étuve de dessiccation à température réglable à 105°C et 5°C.
- Une balance : balance de portées maximal et minimal compatibles avec les masse de sol à peser et telle que les pesées sont effectuées avec une incertitude de 1/1000 de la valeur de la masse de sol ;
- Un chronomètre indiquant la seconde ;
- Une spatule, couteau à bord rectiligne, coupelles, capsules ou boîtes de pétri ;
- Une plaque lisse en marbre ou en matériau d'état de surface équivalent ;
- Un Tamis dont un tamis à maille carrée de 400µm d'ouverture nominale ;
- Une réserve d'eau déminéralisée ;



Figure (II-18) : une balance



Figure (II-19) : Une étuve

c-Matériel pour la réalisation de l'essai

Le matériel nécessaire à la réalisation de cet essai est constitué :

- d'un socle avec son dispositif de réglage de l'horizontalité et une tige cervicale sur laquelle coulisse une pince de blocage ;
- d'un cône de pénétration constitué d'une tige solidaire d'un cône, le cône à surface lisse a un angle au sommet de 30° et une hauteur minimal de 35mm, la masse totale de la tige et du cône est de 80g (voir figure 3 et tableau1) ;
-
-
- d'un dispositif de mesure du déplacement de cône sans influence sur le déplacement de celui-ci l'incertitude sur la mesure de l'enfoncement de cône doit être inférieure 0.1mm ;
- d'un récipient cylindrique rigide (verre, métal,.....) de plus petite dimension transversal intérieure supérieure ou égale à 55mm et de hauteur supérieure ou égale à 35mm, destiné à contenir le sol soumis à l'essai ;

d-Mode Opératoire

Les opérations décrites ci-dessous sont à réaliser successivement

d-1- Préparation du sol

Après échantillonnage, du sol et homogénéisation par brassage, une masse m de matériau est mise à imbiber dans un récipient d'eau pendant 24 h au moins à la température ambiante. Cette masse m , exprimée en grammes, doit être supérieure à 200 fois la dimension des plus gros éléments de sol appréciée visuellement et exprimée en millimètres. De même, elle doit être telle que le tamis de 400 μ m, l'eau de lavage et le tamisât sont recueillis dans un bac, après une durée de décantation d'eau moins 12h, sans aucun additif destiné à accélérer le dépôt et sans utilisation d'un procédé quelconque de centrifugation. L'eau claire du bac est siphonnée sans entrainer de particules solides, L'eau excédentaire est évaporée à une température ne dépassant pas 50°C.

d-2-Essai de pénétration

- régler l'horizontalité
- s'assurer que la point du lisse, la totalité du tamisa précédemment préparé afin d'obtenir une pate homogène et presque fluide ;
- remplir le récipient avec une partie de cette pate au moyen d'une spatule, en prenant soin de ne pas emprisonner de bulles d'air, araser avec un couteau afin d'obtenir une surface lisse et plane ;
- mettre en place le récipient et ajuster la position de la point du cône approximativement au centre de la surface du récipient en faisant coulisser la tige du cône dans la gaine de guidage de façon à ce que la pointe affleure juste la surface du sol. Le cône est dans une position correcte, si en déplaçant Le récipient horizontalement la point du cône ne laisse qu'une légère trace à la surface du sol ;
- repérer la position du cône ;
- libérer le cône et le laisser s'enfoncer dans le sol pendant $5s \pm 1s$ puis le bloquer. Noter sa nouvelle position ;
- enlever le cône ;
- effectuer un prélèvement de sol dans le récipient, dans la zone de pénétration du cône. Cette prise d'essai est placée dans une coupelle de masse connue, pesée immédiatement puis introduite dans l'étuve pour dessiccation et mesure de sa teneur en eau conformément à la norme NF P 94- 050.
- compète est effectuée au moins quatre fois sur la même pâte mais avec une teneur en eau différente pour chaque essai. La pâte est selon le cas légèrement séchée ou humidifiée avec de l'eau dénivelée 12 mm à 25mm et l'écart deux valeurs consécutives doit être compris entre compris entre 2mm et 5mm inclus.

CHAPITRE III

PRÉSENTATION DES RÉSULTATS

CHAPITRE III

PRÉSENTATION DES RÉSULTATS

Le programme expérimental de notre sujet a été réalisé dans sa majorité au laboratoire de génie civil de l'université de m'sila, une partie au LCTP « antenne de M'sila », et une dernière partie au laboratoire de la cimenterie La Farge de Hammam eddhalaâ. Les résultats qui seront analysés et exploités dans ce chapitre sont obtenus à partir de l'exécution des essais préliminaires et principaux décrits dans le chapitre précédent.

I - RÉSULTATS DES ESSAIS PRÉLIMINAIRES

a- Analyse granulométrique par tamisage

Elle se fait par tamisage par voie humide pour les sols dont les éléments sont supérieurs à 80 μ m (NF P94-056) et par sédimentation pour les éléments inférieurs ou égaux à 80 μ m (NF P94- 057). Les résultats obtenus par cet essai sont donnés dans les tableaux suivants :

a-1-Analyse granulométrique par tamisage de sable

Tamis (mm)	Refus partiel (g)	Refus cumulé	Refus cumulé(%)	Tamis cumulé(%)
5	134	134	2.02	90.98
2.5	66	200	13.47	86.53
1.25	41	241	16.23	83.77
0.63	41	282	19.00	81
0.315	202	484	32.61	67.39
0.125	949	1433	96.56	3.44
0.080	41	1474	99.32	0.68
fines	10	1484	100	0

Tableau III-1 : résultats de l'analyse granulométrique de sable

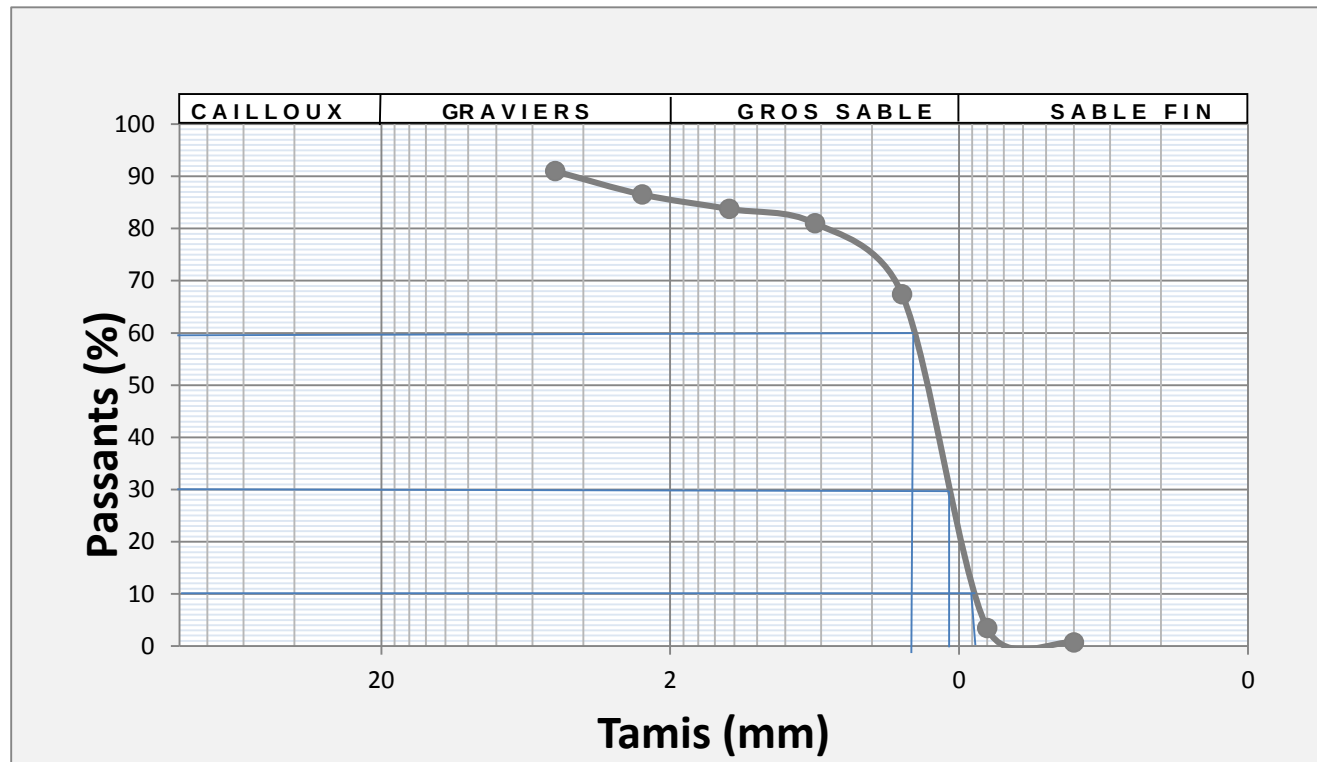


Figure III-1 : courbe granulométrique par tamisage de sable

Donc les caractéristiques du sable utilisé sont :

- ✓ Coefficient d'uniformité : $C_u = d_{60}/d_{10} \rightarrow C_u = 2.78$
- ✓ Coefficient de courbure : $C_c = d_{30}^2 / (d_{60} d_{10}) \rightarrow C_c = 1.12$

I-3 : Analyse granulométrique du kaolin

<i>Tamis</i>	<i>Tamisât (%)</i>
0.008	100
0.064	86.95
0.045	73.61
0.040	68.6
0.032	59.82
0.016	37.56
0.008	21.55
0.004	8.9
0.002	2.33

Tableau III-3 : Granulométrie par laser de kaolin.

Les résultats de l'analyse granulométrique c'est l'assemblage de ceux par tamisage Pour Les particules supérieures ou égales à 80µm et celles déduites de l'analyse par laser (pour les Particules inférieures à 80µm.

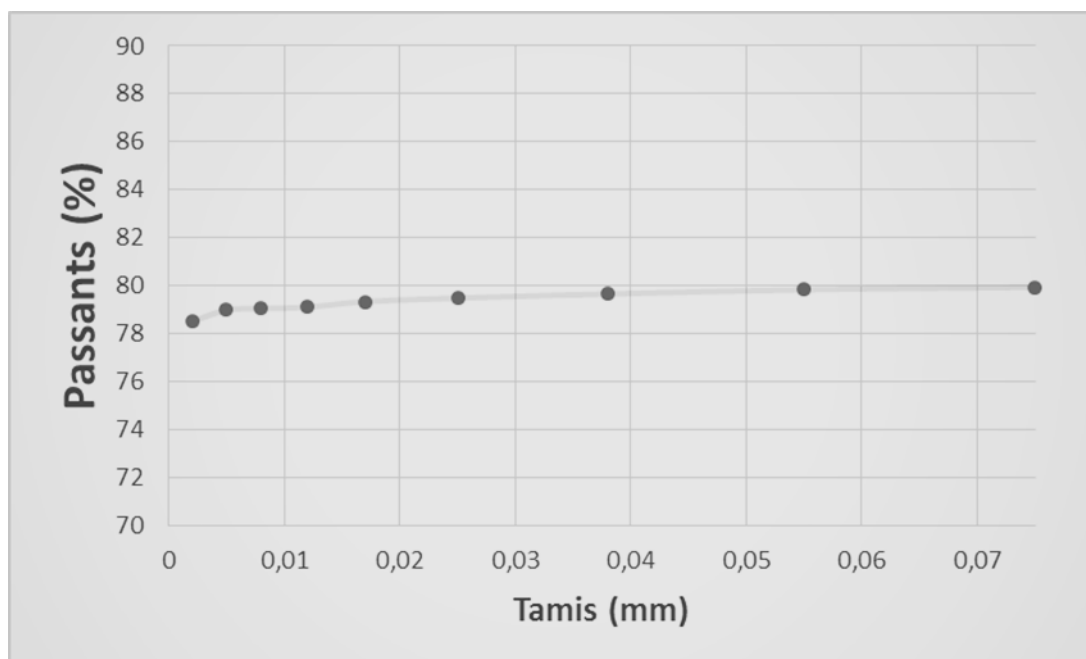


Figure III-2 : courbe granulométrique de

Donc les caractéristiques du sable utilisé sont :

- Coefficient d'uniformité : $C_u = \dots \rightarrow C_u = \dots \rightarrow C_u = 9,44$.
- Coefficient de courbure : $C_c = \dots \rightarrow C_c = \dots \rightarrow C_c = 2.64$.

I-1-b : Analyse granulométrique par tamisage de sol reconstitue

<i>Tamis en (mm)</i>	<i>Tamisât</i>
2	100
1	96.45
0.4	89.69
0.2	45.7
0.1	34.24
0.08	22.1
0.04	18
0.02	12.34
0.01	7.4
0.004	2.76
0.002	0.3

Tableau III-2 : Résultats de l'analyse granulométrique par tamisage des sols reconstitutions.

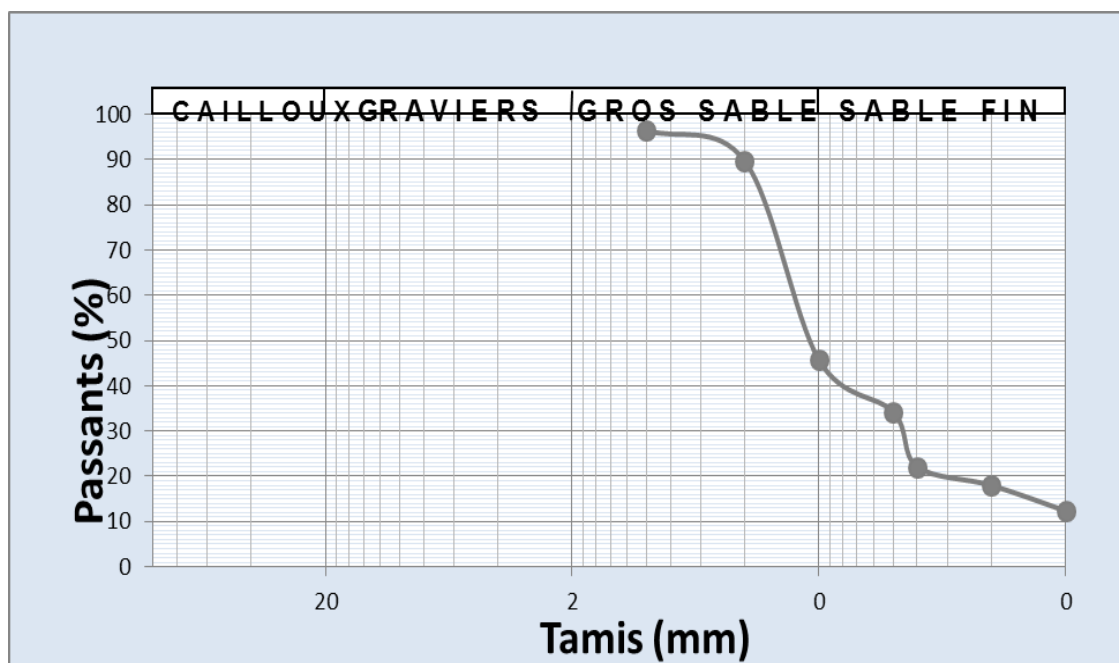


Figure III-3 : courbe granulométrique de kaolin

b-Equivalent de sable

L'objectif de l'essai est de déterminer la propreté d'un sable. Les résultats d'équivalent de sable sont donnés dans le tableau ci-dessous :

	h1	h2	h'2	ESV	ESP
essi1	11,2	8,7	7,7	77,87	73,82
essi2	11,1	8,2	7,1	73,97	70,96
essi3	11,6	8	7,2	69,96	69,89
				73,93	70,71

Tableau III-4 : résultats d'équivalent de sable

c- la masse volumique***c-1- la masse volumique absolue***

➤ On rappelle que :

- ✓ M_0 : masse du pycnomètre.
- ✓ M_1 : masse du pycnomètre + les grains solides.
- ✓ M_2 : masse total (pycnomètre + les grains solides + l'eau).
- ✓ M_3 : masse du pycnomètre + l'eau.

Les résultats obtenus sont donnés dans le tableau suivant :

❖ La masse volumique absolue du sable

N d'essai	M0(g)	M1(g)	M2(g)	M3(g)	MP	MOY
P1	67,51	97,21	185,67	165,91	2,99	2,64 g/cm3
P2	66,56	97,52	186,19	166,53	2,74	
P3	67,76	97,15	188,43	172,46	2,19	

Tableau III-5: résultats du poids spécifique du sable.

❖ *La masse volumique absolue du kaolin*

N d'essai	M0 (g)	M1 (g)	M2 (g)	M3 (g)	MP	moyen
P1	69,00	98,90	183,70	168,80	1,99	2,06 g/cm ³
P2	67,80	97,90	183,70	167,70	2,13	
P3	68,40	98,20	185,50	170,20	2,06	

Tableau III-6: résultats du poids spécifique absolu du kaolin❖ *La masse volumique absolue du sol reconstitué*

N d'essai	M0(g)	M1(g)	M2(g)	M3(g)	MP(g)	MOY (g/cm ³)
P1	67,51	96,30	182,40	165,91	2,34	2.93
P2	66,56	92,50	187,20	166,53	2,92	
P3	67,76	98,40	187,20	172,46	1,93	

Tableau III -7: résultats du poids spécifique absolu du sol reconstitué.❖ *La masse volumique absolue du le déchet de verre*

N d'essai	M ₀ (g)	M ₁ (g)	M ₂ (g)	M ₃ (g)	γ_s (g/cm ³)	γ_s moy (g/cm ³)
Essai 1	68,223	97,954	185,319	165,9	2,88	2,55
Essai 2	68,017	97,938	185,294	166,75	2,62	
Essai 3	69,172	97,93	185,315	169,92	2,15	

Tableau III-8: résultats du poids spécifique absolu du le déchet de verre

c-2-Masse volumique apparente :❖ *La masse volumique apparente de sable sans choc*

La masse volumique apparente est définie comme le rapport de la masse sèche de l'échantillon par le volume occupé par la matière solide, y compris les vides entre les grains le constituant (volume apparent)

$$V = 900 \text{ cm}^3.$$

$$M_{\text{erc.}} = 115\text{g}$$

Masse(g)	v (ml)	Masse volumique (g/l)	moyenne
1294	900	1.43	1.44
1316		1.46	
1289		1.43	

Tableau III-9 : résultats masse volumique apparente de sable sans choc.

❖ *masse volumique apparente du kaolin sans choc*

Masse(g)	v (ml)	Masse volumique	moyenne
1447	900	1.60	1.62
1476		1.64	
1484		1.64	

Tableau III-10 : résultats masse volumique apparente du kaoli

❖ *La masse volumique apparente du sol reconstruite*

Masse(g)	v (ml)	Masse volumique	moyenne
1447	900	1.60	1.52
1476		1.64	
1484		1.64	

Tableau III-11 : résultats masse volumique apparente du sol reconstruite

d-Bleu de méthylène✓ **le sable**

N ⁰ des essai	1	2	3
V de bleu eu méthlméthylène	15	10	15
vbs	0.5	0.33	0.5

Tableau III-12 : résultats d'essai bleu de méthylène du sable✓ **Le kaolin :**

N ⁰ des essai	1	2	3
V de bleu eu méthlméthylène	55	55	55
vbs	1.83	1.83	1.83

Tableau III-13 : résultats d'essai bleu de méthylène du kaolin.✓ **Sol reconstitué**

N ⁰ des essai	1	2	3
V de bleu eu méthlméthylène	45	40	35
vbs	1.23	1.33	1.54

Tableau III-14 : résultats d'essai bleu de méthylène du sol reconstitué.

e-Essai de Proctor

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

Les résultats obtenus sont donnés dans le tableau suivant :

e-1- Sol reconstitué non traité

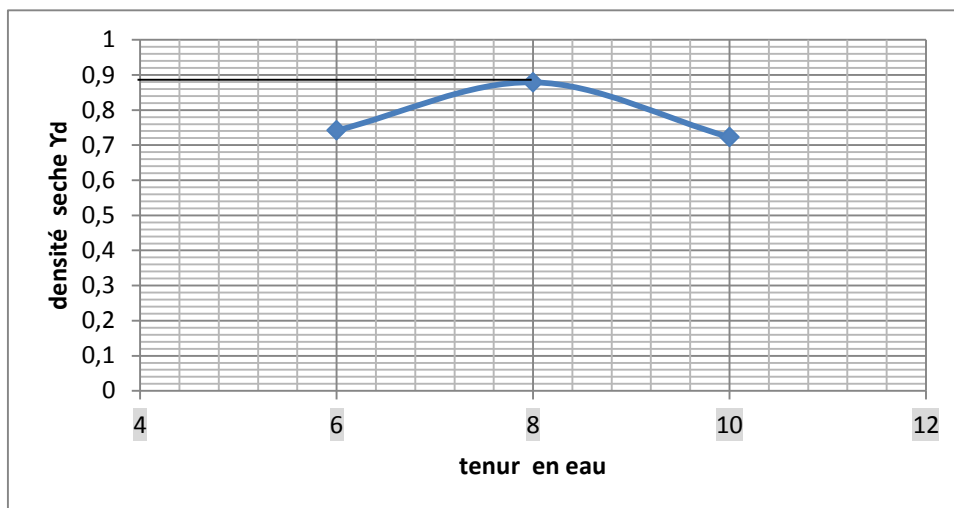
❖ **Résultats d'essai Proctor :**

❖ $\gamma = 0.82 \text{ (T/m}^3\text{)}_d$

❖ $W_{opt} = 8,1 \text{ \%}$.

masse d'eau ajoutée g	6	8	10
masse total humide, W_2 (g)	3987,65	4356,23	3987,25
masse du sol humide, $w_3 = (w_2 - w_1)$ (g)	1842,25	2210,83	1841,85
masse du sol sec (g)	1731,715	2033,9636	1657,665
volume du moule, v (cm ³) :	22,95	22,95	22,95
masse volumique humide, $Y_b = (w_3/v)$ (t/m ³)	0,803	0,963	0,803
masse volumique sèche $Y_d = 100(Y_b/1+w/100)$ (t/m ³)	0,742	0,879	0,723
tare N°	1	2	3
masse de la tare, w_5 (g)	50,30	50,10	50,40
masse (sol humide+tare), w_6 (g)	636,27	568,45	632,54
masse (sol sec+tare), w_7 (g)	592,00	523,24	575,00
masse d'eau, $w_8 = (w_6 - w_7)$ (g)	44,27	45,21	57,54
masse du sol sec, $w_9 = (w_7 - w_5)$ (g)	541,70	473,14	524,60
teneur en eau $w = 100 \cdot w_8/w_9$ (%)	8,17	9,56	10,97

Tableau III-15 : résultats de l'essai Proctor.



FigureIII-4 : courbe essai Proctor.

e-2- Sol reconstitué traité par 6% de verre❖ Résultats d'essais Proctor : $Y_d=0.706$ $w_{opt}=8\%$

masse d'eau ajoutée g	6	8	10
masse total humide, W_2 (g)	3832,6	3919,7	3909,7
masse du sol humide, $w_3 = (w_2 - w_1)$ (g)	1687,2	1774,3	1764,3
masse du sol sec (g)	1585,968	1632,356	1587,87
volume du moule, v (cm ³) :	22,95	22,95	22,95
masse volumique humide, $Y_b = (w_3/v)$ (t/m ³)	0,735	0,773	0,769
masse volumique sèche $Y_d = 100(Y_b/1+w/100)$ (t/m ³)	0,680	0,706	0,693
tare N°	1	2	3
masse de la tare, w_5 (g)	50,30	50,10	50,40
masse (sol humide+tare), w_6 (g)	636,27	568,45	632,54
masse (sol sec+tare), w_7 (g)	592,00	523,24	575,00
masse d'eau, $w_8 = (w_6 - w_7)$ (g)	44,27	45,21	57,54
masse du sol sec, $w_9 = (w_7 - w_5)$ (g)	541,70	473,14	524,60
teneur en eau $w = 100 * w_8 / w_9$ (%)	8,17	9,56	10,97

Tableau III-16 : résultats de l'essai Proctor

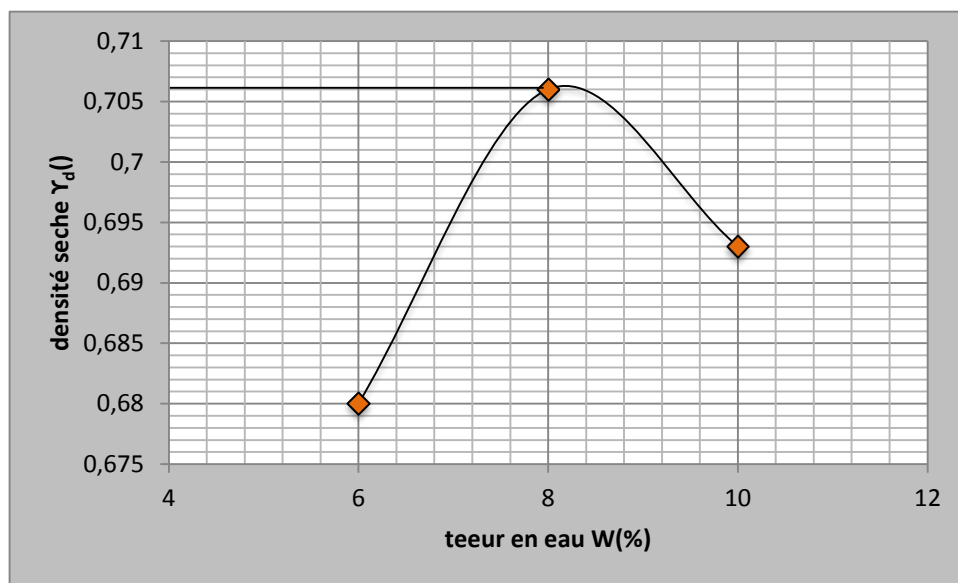


Figure III-5 : courbe essai Proctor.

f- limites d'Atterberg

f-1-Le kaolin

❖ Limite de liquidité

Les résultats obtenus sont donnés dans les tableaux suivant :

N de coup	20,00		23,00		26,00		33,00	
M de la tare(g)	20,50	20,70	29,30	8,40	16,60	20,50	19,40	20,90
M de Sol hum tare(g)	35,75	39,90	40,70	29,20	26,40	35,30	30,60	41,40
M de soles tare(g)	33,20	34,01	37,33	26,30	25,36	31,04	30,53	39,50
M d'eau(g)	2,55	5,89	3,37	2,90	1,04	4,26	3,00	1,90
M de sol sec(g)	12,70	13,31	8,03	17,90	8,76	10,54	11,13	18,60
teneur en eau(%)	21,08	32,25	30,04	28,20	25,87	26,42	19,95	17,22
moyenne	32,17		40,23		41,95		42,6	

Tableau III-17: Teneurs en eau moyenne du kaolin.

❖ *Limite de plasticité*

M de la tare(g)	8,60	8,70	8,80	8,50	8,80	23,71	8,50	17,10
Hum+tarre(g)	9,20	9,18	9,30	9,00	9,43	24,30	9,10	17,65
M de sec+tare(g)	9,12	9,17	9,29	8,89	9,42	24,23	8,83	17,51
M d'eau(g)	0,08	0,01	0,01	0,11	0,01	0,07	0,27	0,14
M de sol sec(g)	0,52	0,47	0,49	0,39	0,62	0,52	0,33	0,41
teneur en eau(%)	15,38	18,13	15,04	15,21	13,26	13,46	11,82	11,15
moyenne	16,76		15,12		13,52		11,35	
Wp(%)	14.18							
Ip	23.21							

Tableau III-18 : limites plasticité du kaolin.

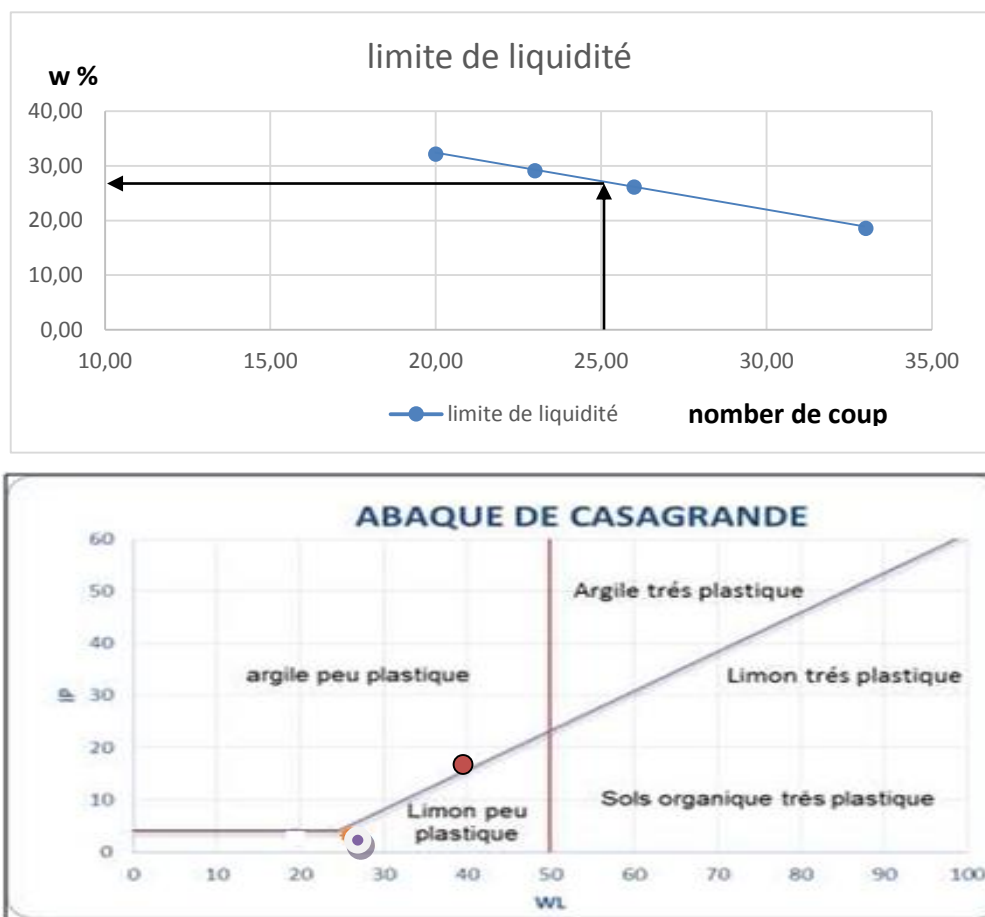


Figure III-6 : Position du kaolin testé dans l'abaque de Casagrande

IV– 2- le sole non traité reconstitué

M=(g), w=(%)

Nombre de coup	16		26		34	
Masse de la tare	20,94	20,92	21,01	20,92	21,05	21,24
M de tare+sol hum	36,83	39,42	43,81	39,31	50,63	38,5
M de tare+sol sec	32,56	35,2	40,32	34,5	46,32	36,23
Masse de l'eau	4,27	5,15	3,49	2,56	4,31	2,27
Masse de sol sec	11,62	14,28	19,31	13,58	25,27	14,99
Teneur en eau	36,75	36,06	18,07	18,85	17,06	15,14
Moyenne	36,41		18,46		16,10	

Tableau III-19 : Teneurs en eau moyenne du sol reconstitué non traité

M=(g) ,w=(%)

Nombre de coup	16		26		34	
Masse de la tare	23,6	50,3	24	23,7	17	23,5
M de tare+sol hum	27,3	53,2	27,4	28,5	20,1	27,9
M de tare+sol sec	26,7	53	27,3	28,3	19,9	25,8
Masse de l'eau	1,02	0,87	0,65	0,79	0,41	0,35
Masse de sol sec	3,1	2,7	3,3	4,6	2,9	2,3
Teneur en eau	32,90	32,22	19,70	17,17	14,14	15,22
Moyenne	32,56		18,44		14,68	
wp(%)	21,89					
Ip	1,76					

Tableau III-20: limites plasticité du sol reconstitué non traité

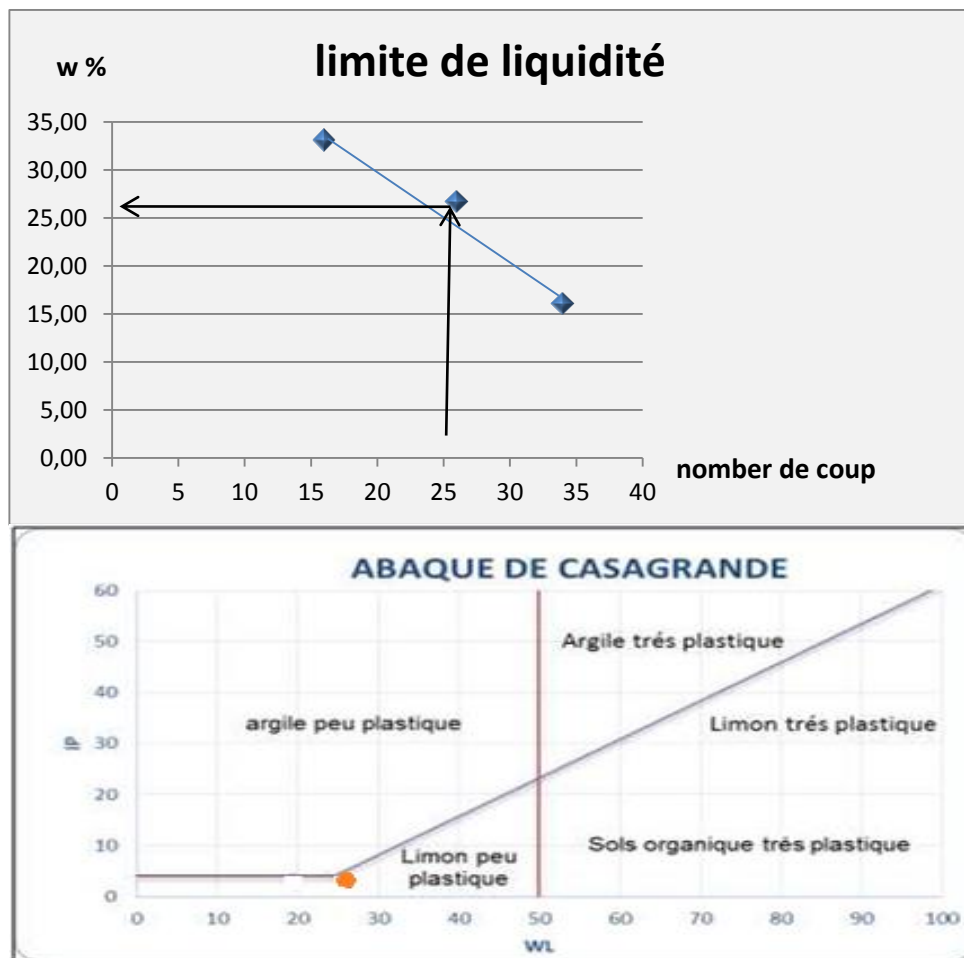


Figure III-7: Position du sol reconstitué non traité testé dans l'abaque de Casagrande
IV-3-le sol reconstitué traité par 2% de verre

❖ Essais 1 : $w_l=24.93\%$

$M=(g)$, $w=(\%)$

Nombre de coup	18		23		30	
Masse de la tare	21,5	21,3	20,4	21,1	21	20,9
M de tare+sol hum	29,6	26,5	27,9	27,9	36,3	30,4
M de tare+sol sec	27,1	25,6	26,3	26,3	33,2	29,1
Masse de l'eau	1,7	1,3	1,4	1,4	2,3	1,6
Masse de sol sec	5,6	4,3	5,9	5,2	12,2	8,2
Teneur en eau	30,36	30,23	23,73	26,92	18,85	19,51
Moyenne	30,29		25,33		19,18	

Tableau III-21 : Teneurs en eau moyenne du sol reconstitué traité par 2% de verre(1)

$M=(g)$, $w(\%)$

Nombre de coup	18		23		30	
Masse de la tare	50,6	49,8	50,1	51,9	50,4	53,8
M de tare+sol hum	53,4	52,3	53,5	55,6	53,9	56,5
M de tare+sol sec	52,5	52	52,1	55,1	53,6	56,2
Masse de l'eau	1,65	1,34	0,32	0,5	0,43	0,02
Masse de sol sec	4,76	2,2	2	3,2	3,6	2,7
Teneur en eau	34,66	60,91	16,00	15,63	11,94	0,74
Moyenne	47,79		15,81		6,34	
wp(%)	23,31					
Ip	1,62					

Tableau III-22: limites plasticité du sol reconstitué par 2%de verre(1)

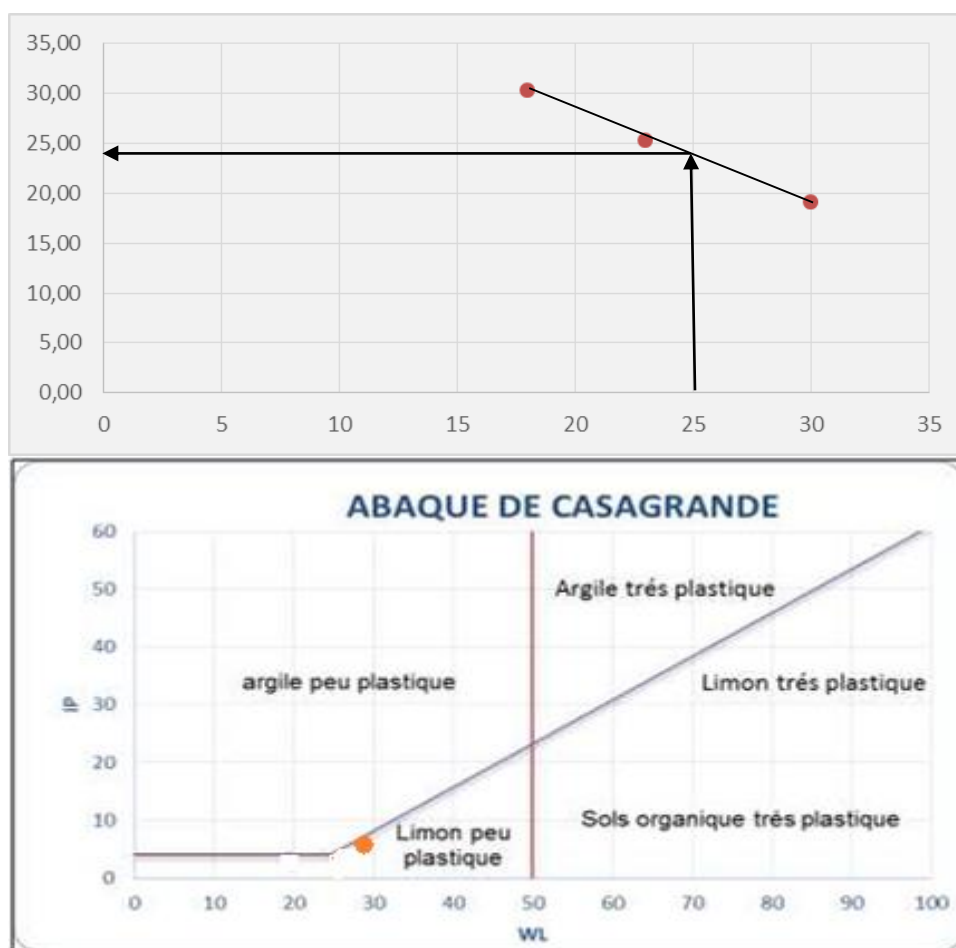


Figure III-8: Position du sol reconstitué traité par 2% de verre testé dans l'abaque de Casagrande

❖ **Essais n2 : $w_l=24.41\%$**

M=(g), w=(%)

Nombre de coup	19		24		35	
Masse de la tare	21,4	20,9	20,8	20,4	20,9	21,1
M de tare+sol hum	29,5	30,8	37,2	30	36,3	29,3
M de tare+sol sec	27,6	28,2	36,5	29,4	34,2	28
Masse de l'eau	1,9	2,2	4	2,3	2,1	1,3
Masse de sol sec	6,2	7,3	15,7	9	13,3	6,9
Teneur en eau	30,65	30,14	25,48	25,56	15,79	18,84
Moyenne	30,39		25,52		17,32	

Tableau III-23: Teneurs en eau moyenne du sol reconstitué traité par 2% de verre(2)

M=(g) W=(%)

Nombre de coup	19		24		35	
Masse de la tare	50,2	52,1	50,4	50,4	51,9	51,8
M de tare+sol hum	53,6	55,4	52,3	53,1	54,2	54,3
M de tare+sol sec	53,2	55,1	51,9	52,2	53,7	53,9
Masse de l'eau	0,99	0,98	0,33	0,42	0,4	0,45
Masse de sol sec	3	3	1,5	1,8	1,8	2,1
Teneur en eau	33,00	32,67	22,00	23,33	22,22	21,43
Moyenne	32,83		22,67		21,83	
wp(%)	25,78					
Ip	2,72					

Tableau III-24 : limites plasticité du sol reconstitué par 2%de verre(2)

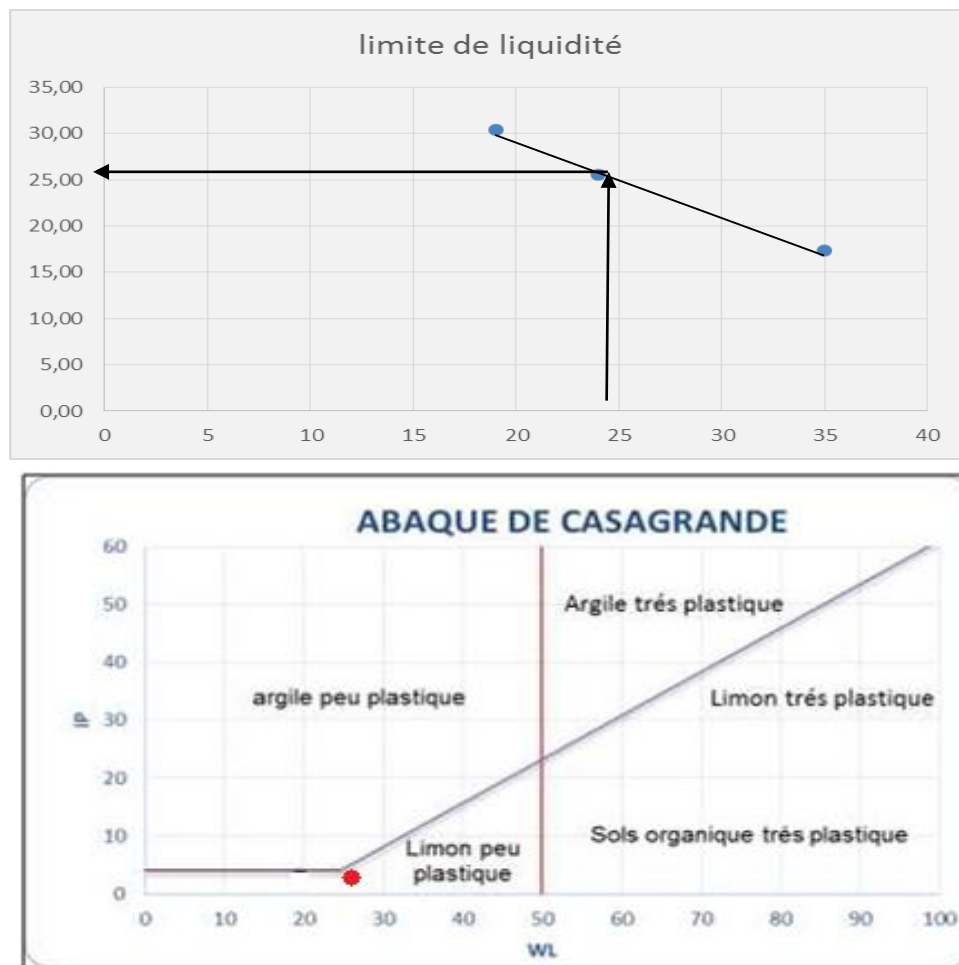


Figure III-9 : Position du sol reconstitué traité par 2% de verre testé dans l'abaque de Casagrande

IV-4-le sol reconstitué traite par 3% de verre $M=(g), w=(\%)$

❖ Essais 1 : $wl=23.69\%$

Nombre de coup	17		22		34	
Masse de la tare	16,7	21,1	15,7	17,1	16,7	21
M de tare+sol hum	27,6	28,1	25,6	29	27,5	30,1
M de tare+sol sec	25	26,5	23,8	26,3	25,6	29,2
Masse de l'eau	2,2	1,6	2,1	2,3	1,6	1,4
Masse de sol sec	8,3	5,4	8,1	9,2	8,9	8,2
Teneur en eau	26,51	29,63	25,93	25,00	17,98	17,07
Moyenne	28,07		25,46		17,53	
	23,69					

Tableau III-27: Teneurs en eau moyenne du sol reconstitué traité par 3% de verre(1)

M=(g), w=(%)

Nombre de coup	17		22		34	
Masse de la tare	23,6	50,3	24	23,7	23,5	51,7
M de tare+sol hum	26,1	53,2	27	28,9	27,4	55,3
M de tare+sol sec	25,8	52,3	26,4	28,3	26,5	54,9
Masse de l'eau	0,77	0,7	0,45	0,75	0,39	0,39
Masse de sol sec	2,2	2	2,4	4,6	3	3,2
Teneur en eau	35,00	35,00	18,75	16,30	13,00	12,19
Moyenne	35,00		17,53		12,59	
wp(%)	21,71					
Ip	2,82					

Tableau III-28: limites plasticité du sol reconstitué traité par 3% de verre(1)

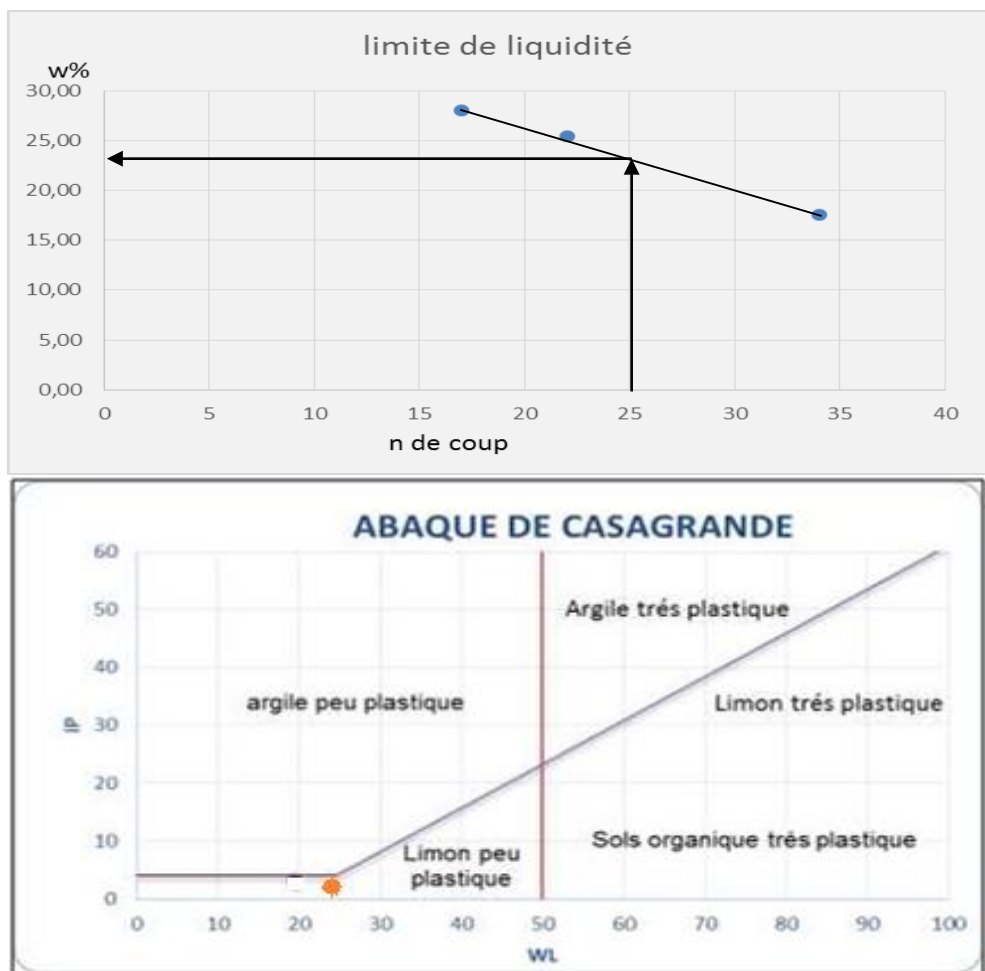


Figure III-11: Position du sol reconstitué traité par 3% de verre testé dans l'abaque de Casagrande

❖ **Essais 2 : $w_l=22.63\%$**

M=(g), w=(%)

Nombre de coup	16		29		31	
Masse de la tare	17	17,5	21,3	21	15,6	20
M de tare+sol hum	23,5	23,6	34	28	27,6	28,7
M de tare+sol sec	21,7	22,1	31,8	26,3	25,4	27,5
Masse de l'eau	1,5	1,5	1,8	1,1	1,7	1,2
Masse de sol sec	4,7	4,6	10,5	5,3	9,8	7,5
Teneur en eau	31,91	32,61	17,14	20,75	17,35	16,00
Moyenne	32,26		18,95		16,67	

Tableau III-29: Teneurs en eau moyenne du sol reconstitué traité par 3% de verre(2)

M=(g),w=(%)

	16		29		31	
Masse de la tare	42,8	50,2	53,8	48,5	24	49,8
M de tare+sol hum	44,2	53,2	56,3	52,9	26,3	52,1
M de tare+sol sec	43,9	53,1	55,3	52,1	26	51,6
Masse de l'eau	0,35	0,91	0,35	0,89	0,49	0,41
Masse de sol sec	1,1	2,9	1,5	3,6	2	1,8
Teneur en eau	31,82	31,38	23,33	24,72	24,50	22,78
Moyenne	31,60		24,03		23,64	
wp(%)	26,42					
Ip	3,85					

Tableau III-30: limites plasticité du sol reconstitué traité par 3% de verre(2)

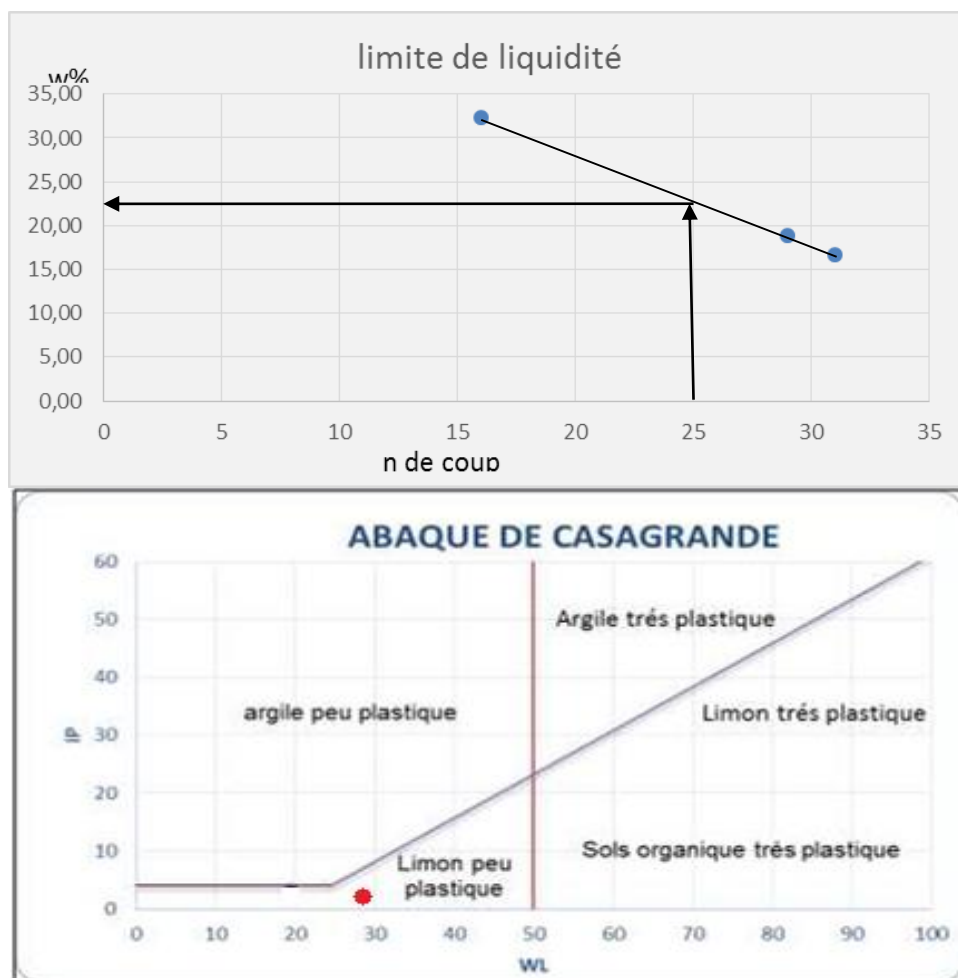


Figure III-12: Position du sol reconstitué traité par 3% de verre testé dans l'abaque de Casagrande

IV-5-le sol reconstitué traite par 4% de verre

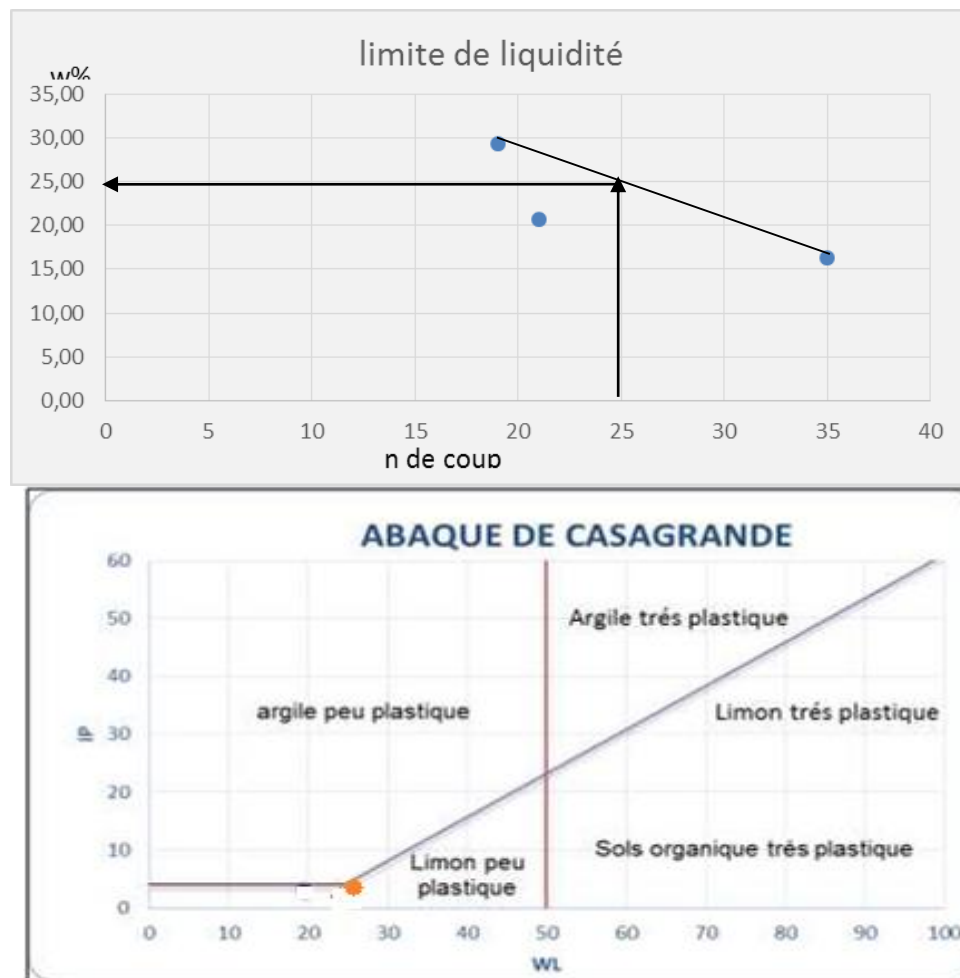
❖ Essais 1 M=(g), w(%) $w_l=22.66\%$

Nombre de coup	19		21		35	
Masse de la tare	15,51	15,69	15,61	21,18	20,9	14,52
M de tare+sol hum	33,1	27,1	28,9	30,9	35,4	22,9
M de tare+sol sec	28,9	24,4	26,4	28,5	32,6	22,8
Masse de l'eau	3,86	2,6	2,23	1,52	1,98	1,29
Masse de sol sec	13,39	8,71	10,79	7,32	11,7	8,28
Teneur en eau	28,83	29,85	20,67	20,77	16,92	15,58
Moyenne	29,34		20,72		16,25	

Table III-33: Teneurs en eau moyenne du sol reconstitué traité par 4% de verre(1)

M=(g), w=(%)

Nombre de coup	19		21		35	
Masse de la tare	20,4	15,5	21	8,7	23,6	21,1
M de tare+sol hum	23,1	17,9	22,9	11,2	27,4	25
M de tare+sol sec	22,9	17,7	22,1	11	27,2	24,6
Masse de l'eau	0,65	0,56	0,21	0,52	0,39	0,4
Masse de sol sec	2,5	2,2	1,1	2,3	3,6	3,5
Teneur en eau	26,00	25,45	19,09	22,61	10,83	11,43
Moyenne	25,73		20,85		11,13	
wp(%)	19,24					
Ip	4,67					

Tableau III-34: limites plasticité du sol reconstitué traité par 4% de verre(1)**Figure III-14: Position du sol reconstitué traité par 4% de verre testé dans l'abaque de Casagrande**

Essais 2

$M=(g)$, $w=(\%)$ **$w_l=20.15\%$**

Nombre de coup	20		23		30	
Masse de la tare	20,94	20,92	21,01	20,92	21,05	21,24
M de tare+sol hum	28,3	29	27,3	28,9	30	29,8
M de tare+sol sec	27,2	27,1	25,9	28,2	29,1	28,2
Masse de l'eau	1,87	1,9	0,89	1,32	0,75	1,02
Masse de sol sec	6,26	6,18	4,89	7,28	8,05	6,96
Teneur en eau	29,87	30,74	18,20	18,13	9,32	14,66
Moyenne	30,31		18,17		11,99	

TableIII-35: Teneurs en eau moyenne du sol reconstitué traité par 4% de verre(2)

$M=(g)$, $w=(\%)$

Nombre de coup	20		23		30	
Masse de la tare	50,1	50,2	51,9	48	51,8	53,8
M de tare+sol hum	52,4	53,1	53,1	51,9	53,5	55,3
M de tare+sol sec	52,3	53	52,6	51,1	53,4	55,2
Masse de l'eau	1,02	0,75	0,13	0,62	0,26	0,23
Masse de sol sec	4,25	2,8	0,7	3,1	1,6	1,4
Teneur en eau	24,00	26,79	18,57	20,00	16,25	16,43
Moyenne	25,39		19,29		16,34	
wp(%)	20,34					
Ip	4,19					

Tableau III-36: limites plasticité du sol reconstitué traité par 4% de verre(2)

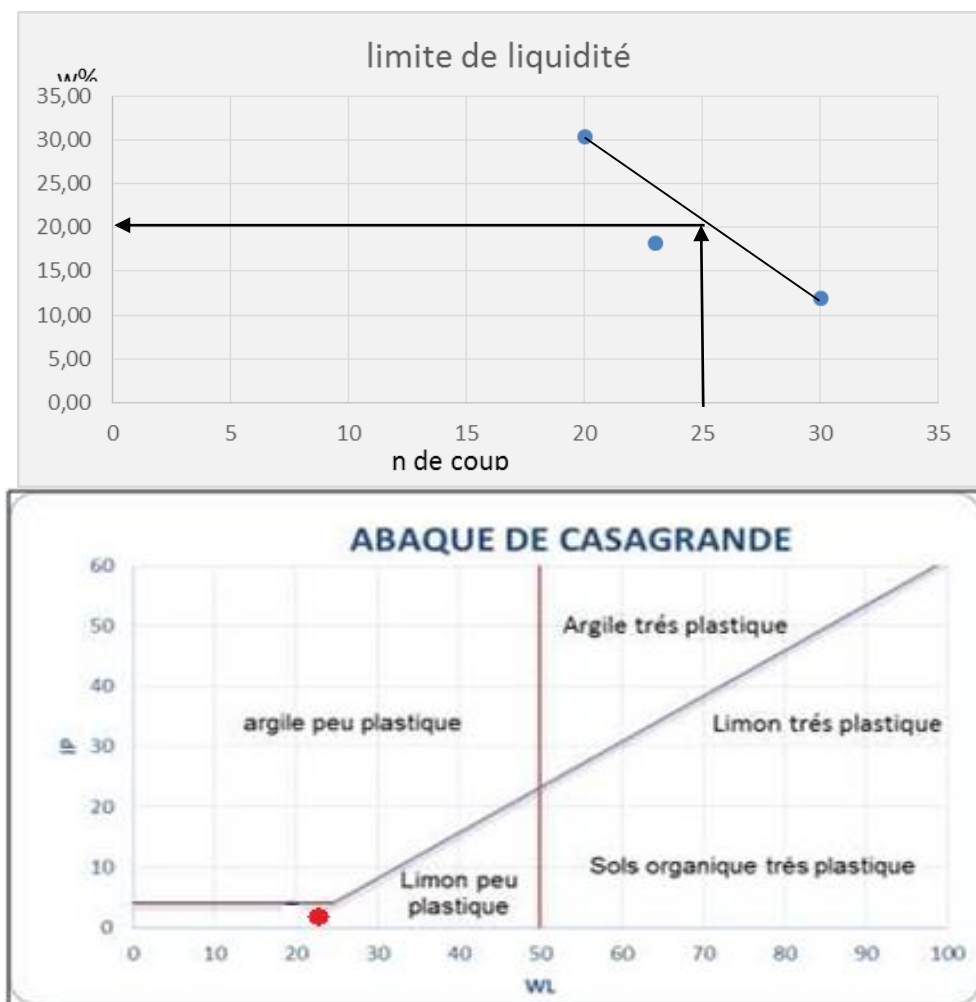


Figure III-16: Position du sol reconstitué traité par 4% de verre testé dans l'abaque de Casagrande

IV-6-le sol reconstitué traite par 5% de verre $M=(g)$, $w=(\%)$

❖ Essais 1 : $wl=19.90\%$

Nombre de coup	16		23		32	
Masse de la tare	42,8	50,2	53,8	50,3	24	49,8
M de tare+sol hum	54,8	60,7	69,4	62,4	37,8	58,8
M de tare+sol sec	52	58,7	66,5	58,6	35,4	57,2
Masse de l'eau	2,35	2,32	1,87	1,65	1,78	1,21
Masse de sol sec	9,2	8,5	12,7	8,3	11,4	7,4
Teneur en eau	25,54	27,29	14,72	19,88	15,61	16,35
Moyenne	26,42		17,30		15,98	

Tableau III-39: Teneurs en eau moyenne du sol reconstitué traité par 5% de verre(1)

Nombre de coup	16		23		30	
Masse de la tare	50,2	51,8	53,8	51,9	50,2	50,1
M de tare+sol hum	53,1	53	55,9	53,8	53,1	53,2
M de tare+sol sec	53	52,9	55,1	53,6	52,6	53
Masse de l'eau	0,99	0,39	0,35	0,56	0,32	0,39
Masse de sol sec	2,8	1,1	1,3	1,7	2,4	2,65
Tenur en eau	35,36	35,45	26,92	32,94	13,33	14,72
Moyenne	35,41		29,93		14,03	
wp(%)	26,45					
Ip	4,50					

Tableau III-40: limites plasticité du sol reconstitué traité par 5% de verre(1)

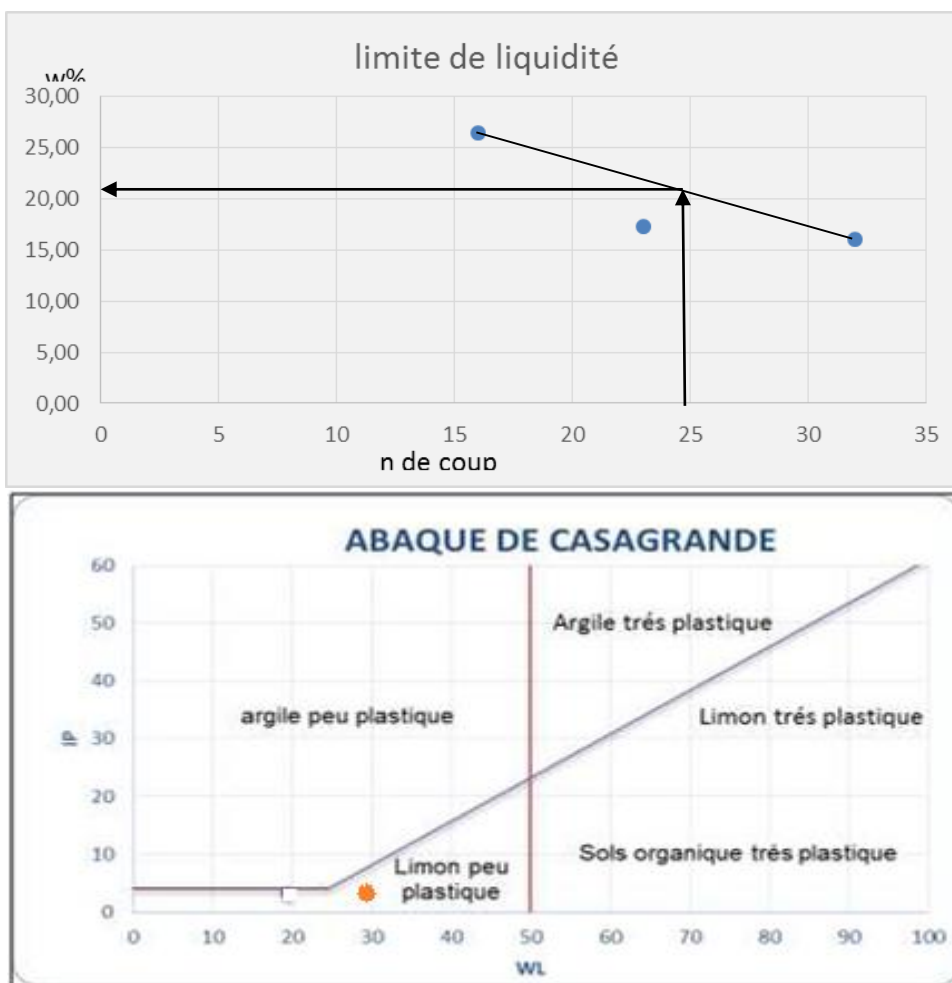


Figure III-17: Position du sol reconstitué traité par 5% de verre testé dans l'abaque de Casagrande

❖ *Essais 2* $M=(g)$, $w=(\%)$ **$w_l=19.26\%$**

Nombre de coup	19		22		30	
Masse de la tare	20,94	20,3	21,24	20,9	21,3	21,05
M de tare+sol hum	30,2	33,5	29	29,9	30,2	32,5
M de tare+sol sec	27,6	30,1	27,2	28,3	28	31,9
Masse de l'eau	1,75	2,56	1,02	1,32	0,95	1,52
Masse de sol sec	6,66	9,8	5,96	7,4	6,7	10,85
Teneur en eau	26,28	26,12	17,11	17,84	14,18	14,01
Moyenne	26,20		17,48		14,09	

Tableau III-41: Teneurs en eau moyenne du sol reconstitué traité par 5% de verre(2)

Nombre de coup	19		22		30	
Masse de la tare	15,5	8,7	23,6	21,1	21	20,4
M de tare+sol hum	18,1	11,2	25,4	23,1	21,5	23,6
M de tare+sol sec	18	11,1	25	22,6	21,3	23,4
Masse de l eau	0,1	0,1	0,4	0,5	0,2	0,2
Masse de sol sec	2,5	2,4	1,4	1,5	0,3	3
Teneur en eau	4,00	4,17	28,57	33,33	66,67	6,67
Moyenne	4,08		30,95		36,67	
wp(%)	23,90					
Ip	4,91					

Tableau III-42 : limites plasticité du sol reconstitué traité par 5% de verre(2)

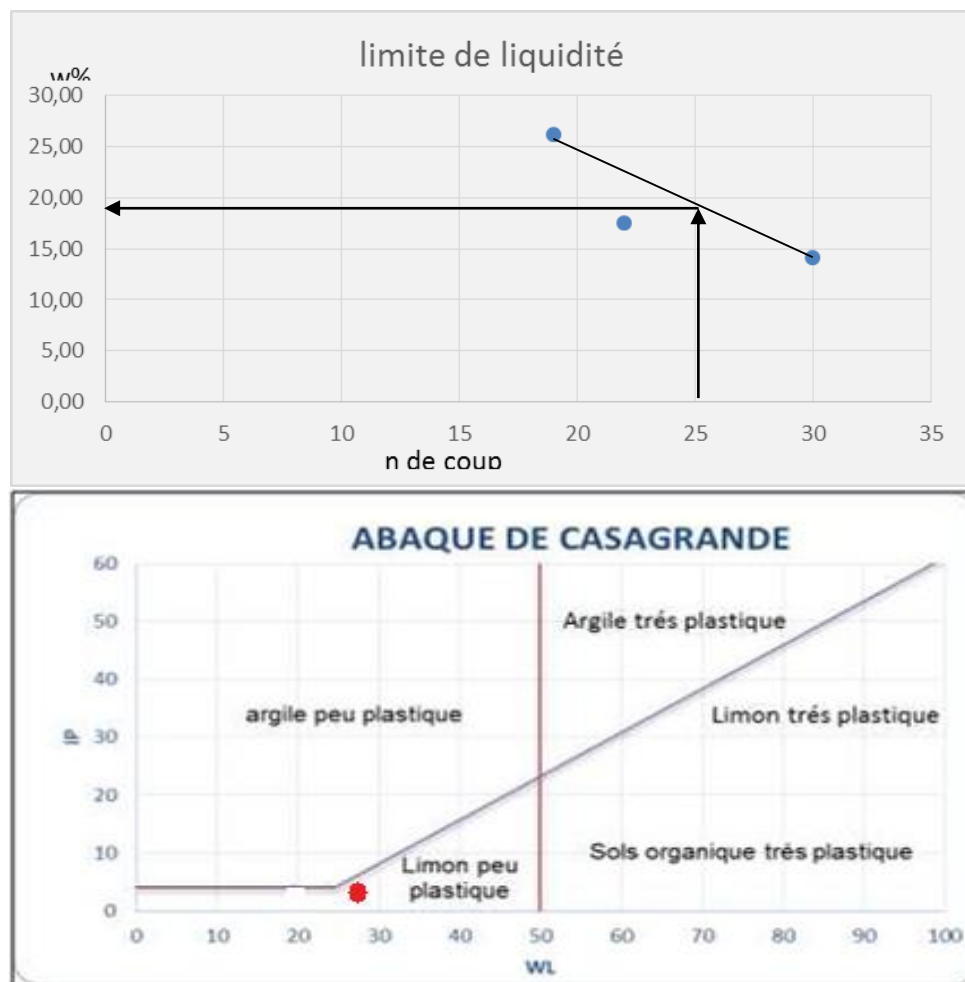


Figure III-18: Position du sol reconstitué traité par 5% de verre testé dans l'abaque de Casagran

IV-7- le sol reconstitué traite par 6%de verre $M=(g)$, $w=(\%)$

❖ Essais 1 : $wl=17.75\%$

Nombre de coup	17		22		30	
Masse de la tare	51,7	50,7	50,1	51,5	50,2	49,8
M de tare+sol hum	70,9	64,2	65,9	66,9	62,9	61
M de tare+sol sec	66,1	61,5	62,2	64,2	60,6	59
Masse de l'eau	3,65	2,65	2,01	2,1	1,2	1,1
Masse de sol sec	14,4	10,8	12,1	12,7	10,4	9,2
Teneur en eau	25,35	24,54	16,61	16,54	11,54	11,96
Moyenne	24,94		16,57		11,75	

Tableau III-45: Teneurs en eau moyenne du sol reconstitué traité par 6% de verre(1)

Nombre de coup	17		22		30	
Masse de la tare	8,9	8,8	8,7	8,9	23,6	50,3
M de tare+sol hum	10,6	10,8	10,3	10,7	25,4	53,2
M de tare+sol sec	10,4	10,6	10,2	10	25,3	53
Masse de l'eau	0,49	0,56	0,19	0,12	0,32	0,35
Masse de sol sec	1,5	1,8	1,5	1,1	2,75	3,5
Teneur en eau	32,67	31,11	12,67	10,91	11,64	10,00
Moyenne	31,89		11,79		10,82	
wp(%)	18,16					
Ip	5,41					

Tableau III-46: limites plasticité du sol reconstitué traité par 6% de verre(1)

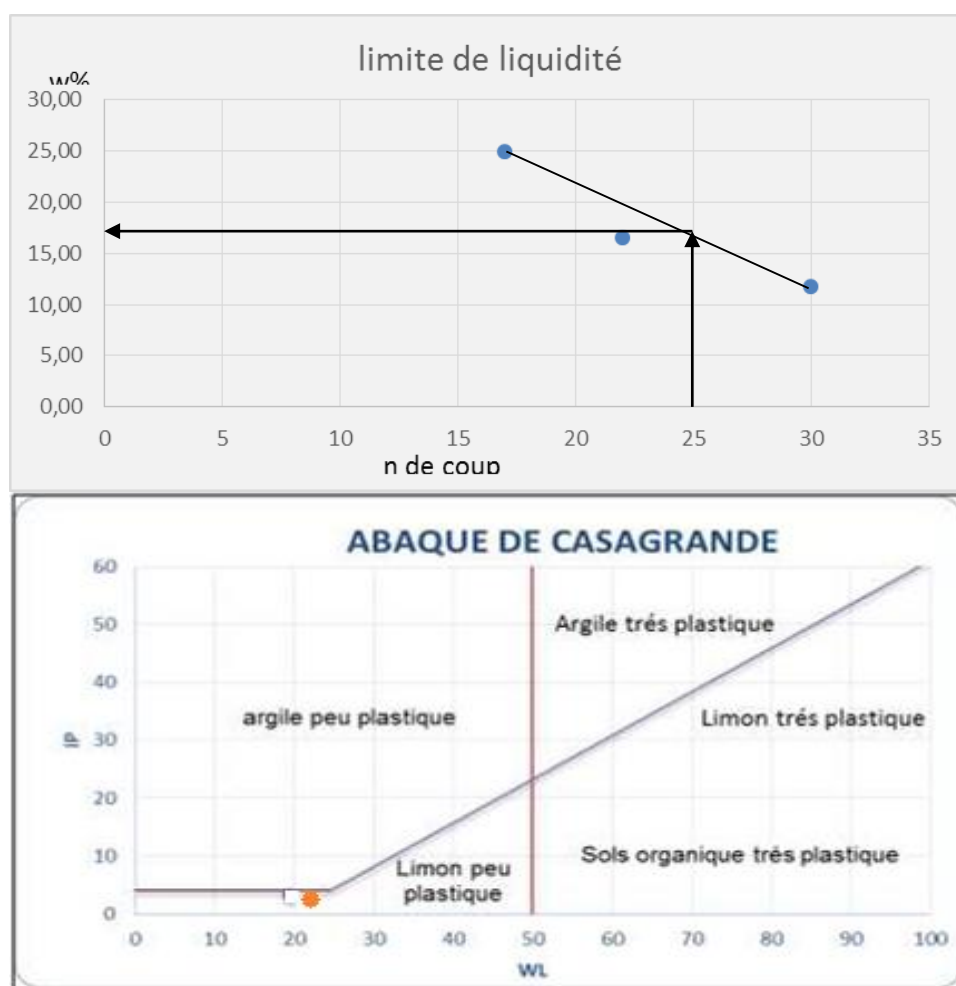


Figure III-20: Position du sol reconstitué traité par 6% de verre testé dans l'abaque de Casagrande

❖ Essais 2 M=(g), w=(%) **wl=16.55%**

Nombre de coup	18		21		31	
Masse de la tare	51,7	50,1	50,7	50,2	49,8	51,5
M de tare+sol hum	68,2	62,3	64,1	65,2	66,3	71,2
M de tare+sol sec	63,2	60,1	60,9	63,1	64,8	69,2
Masse de l'eau	2,45	2,35	1,65	2,02	1,7	2
Masse de sol sec	11,5	10	10,2	12,9	15	17,7
Teneur en eau	21,30	23,50	16,18	15,66	11,33	11,30
Moyenne	22,40		15,92		11,32	

Tableau III-47: Teneurs en eau moyenne du sol reconstitué traité par 6% de verre(2)

Nombre de coup	18		21		31	
Masse de la tare	24	23,7	23,8	23,5	8,6	51,7
M de tare+sol hum	27	25,4	25,6	27,1	10,5	53,1
M de tare+sol sec	26,2	24,3	25,3	26,9	10,3	52,9
Masse de l eau	0,71	0,19	0,3	0,65	0,2	0,2
Masse de sol sec	2,2	0,6	1,5	3,4	1,7	1,2
Teneur en eau	32,27	31,67	20,00	19,12	11,76	16,67
Moyenne	16,44		11,70		6,48	
wp(%)	11,54					
Ip	5,68					

Tableau III-48: limites plasticité du sol reconstitué traité par 6% de verre(2)

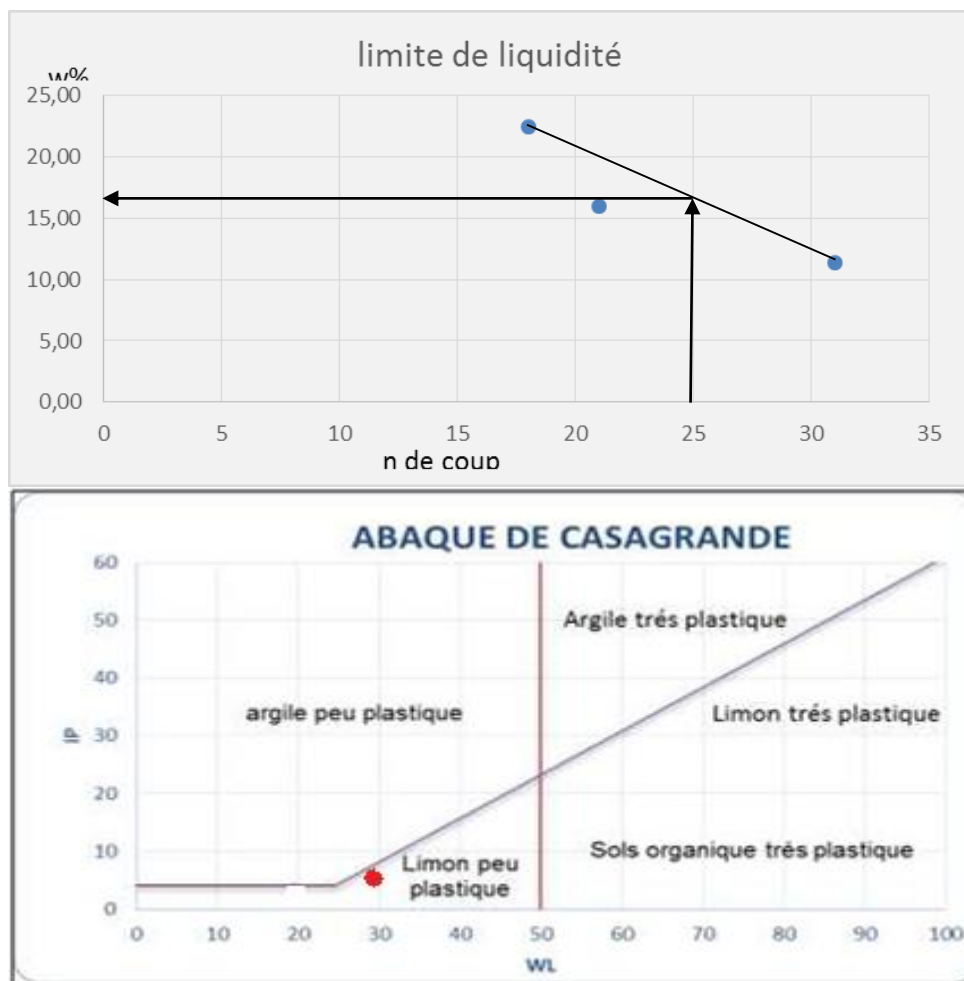


Figure III-21: Position du sol reconstitué traité par 6% de verre testé dans l'abaque de Casagrande
IV-8- le sol reconstitué traité par 7%de verre

❖ *Essais 1* $w_l=19.47\%$

Number de coup	15		21		27	
Masse de la tare	8,9	8,8	8,7	8,9	23,6	50,3
M de tare+sol hum	19,6	18,8	17,6	23,3	36,8	63,5
M de tare+sol sec	16,2	16,6	15,7	20,5	34,2	63,4
Masse de l'eau	2,03	2,36	1,23	1,98	1,32	1,53
Masse de sol sec	7,3	7,8	7	11,6	10,6	13,1
Teneur en eau	27,81	30,26	17,57	17,07	12,45	11,68
Moyenne	29,03		17,32		12,07	

TableauIII-51: Teneurs en eau moyenne du sol reconstitué traité par 7% de verre(2)

Nombre de coup	15		21		27	
Masse de la tare	15,5	20,4	20,8	20,9	21,1	21,4
M de tare+sol hum	18,2	23,1	23,5	23,4	24,6	25,2
M de tare+sol sec	17,9	22,8	22,6	23	23,8	25
Masse de l eau	0,65	0,65	0,45	0,53	0,19	0,21
Masse de sol sec	2,4	2,4	1,8	2,1	2,7	3,6
Tenur en eau	27,08	27,08	25,00	25,24	7,04	5,83
Moyenne	27,08		25,12		6,44	
wp(%)	19,55					
Ip	6,10					

Tableau III-52: limites plasticité du sol reconstitué traité par 7% de verre(1)

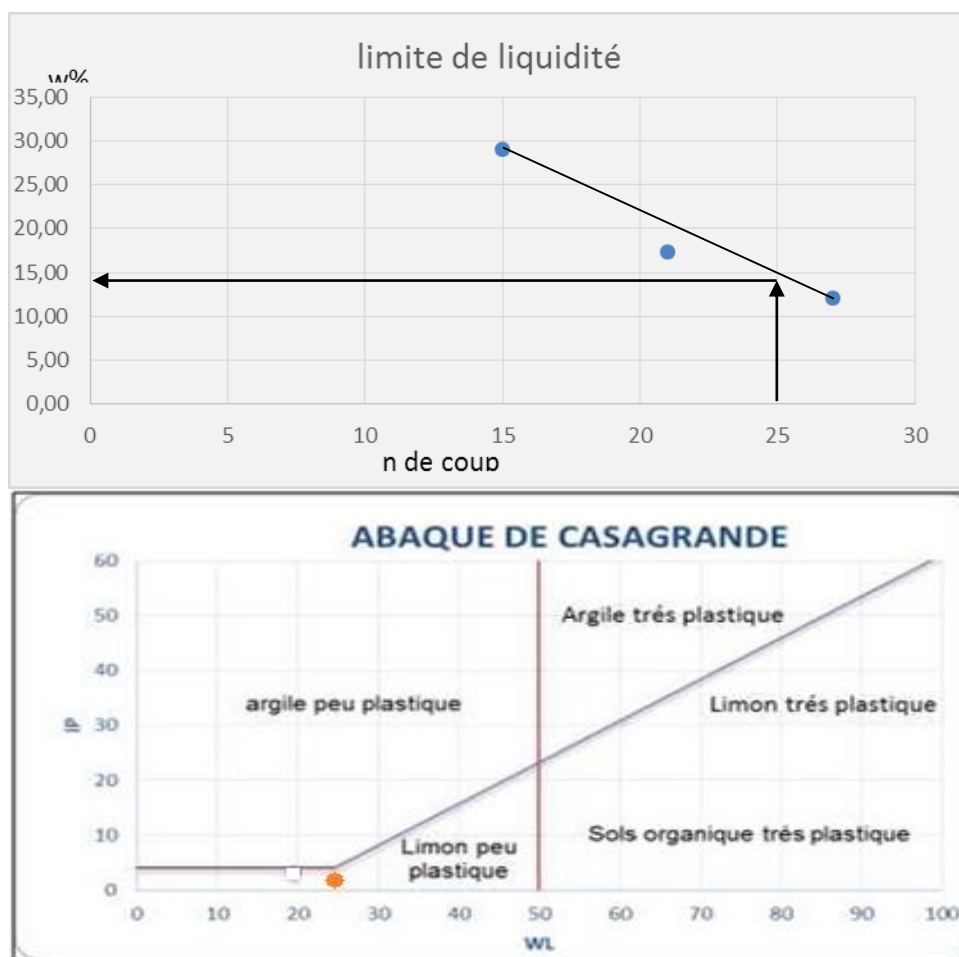


Figure III-23: Position du sol reconstitué traité par 7% de verre testé dans l'abaque de Casagrande

❖ *Essais 2* $M=(g)$, $w(\%)$ $wl=15.35\%$

Nombre de coup	20		22		31	
Masse de la tare	51,7	51,5	49,8	51,1	50,2	51,1
M de tare+sol hum	60,3	64,2	65,3	60,5	65,4	68,2
M de tare+sol sec	58,6	61,2	63,1	58,3	62,4	66,8
Masse de l'eau	1,23	1,75	2,2	1,2	1,45	1,75
Masse de sol sec	6,9	9,7	13,3	7,2	12,2	15,7
Teneur en eau	17,83	18,04	16,54	16,67	11,89	11,15
Moyenne	17,93		16,60		11,52	

Tableau III-53: Teneurs en eau moyenne du sol reconstitué traité par 7% de verre(2)

Nombre de coup	20		22		31	
Masse de la tare	50,1	50,2	49,8	51,8	53,8	50,4
M de tare+sol hum	53,3	52,8	53	53,1	55,4	52,7
M de tare+sol sec	53	52,4	52,4	52,7	55,2	52,5
Masse de l'eau	0,85	0,62	0,52	0,19	0,15	0,2
Masse de sol sec	2,9	2,2	2,6	0,9	1,4	2,1
Teneur en eau	29,31	28,18	20,00	21,11	10,71	9,52
Moyenne	28,75		20,56		10,12	
wp(%)	19,81					
Ip	5,46					

Tableau III-54: limites plasticité du sol reconstitué traité par 7% de verre(2)

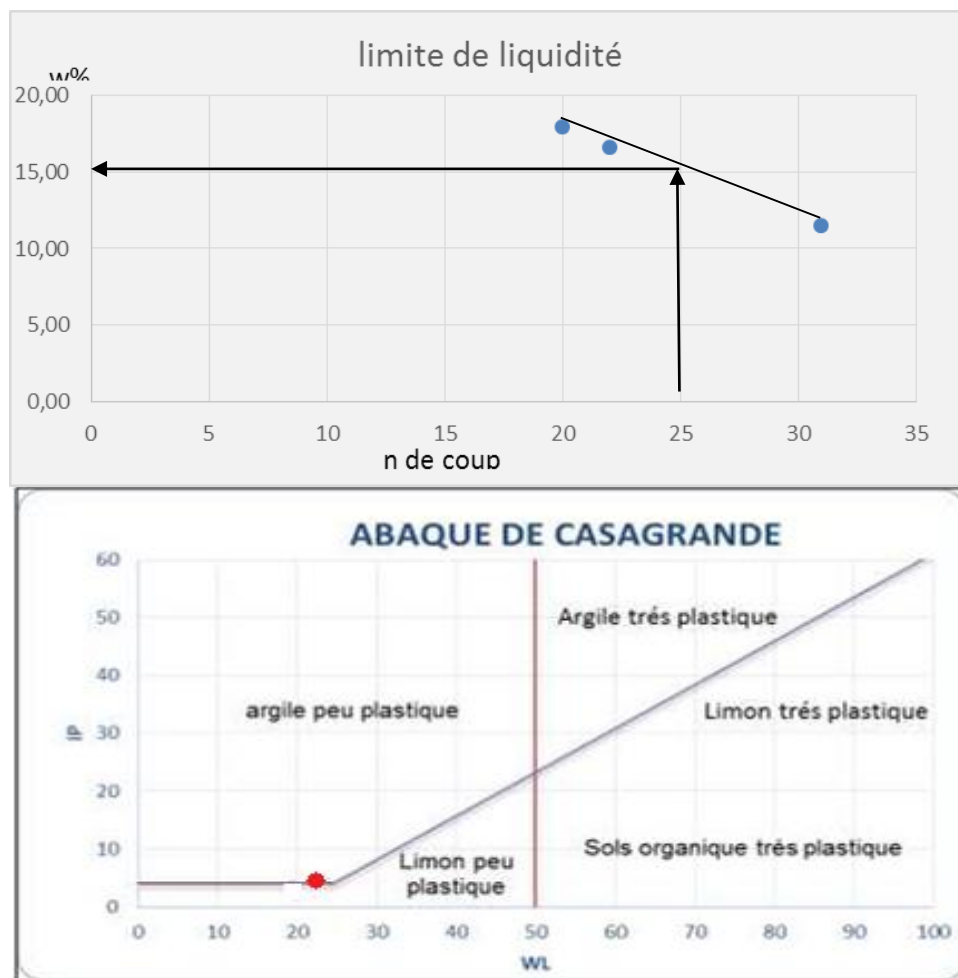


Figure III-24: Position du sol reconstitué traité par 7% de verre testé dans l'abaque de Casagrande

IV-9- le sol reconstitué traité par 8% de verre (Essais 1)

$M=(g), w=(\%)$

$wl=13.84\%$

Nombre de coup	17		24		32	
Masse de la tare	24	23,7	23,6	23,5	8,6	51,7
M de tare+sol hum	36,5	35,5	33,8	40,6	21,4	62
M de tare+sol sec	33,2	32,5	31,2	37,2	18,8	60,1
Masse de l'eau	1,69	1,78	0,89	1,63	1,09	0,85
Masse de sol sec	9,2	8,8	7,6	13,7	10,2	8,4
Teneur en eau	18,37	20,23	11,71	11,90	10,69	10,12
Moyenne	19,30		11,80		10,40	

Tableau III-57: Teneurs en eau moyenne du sol reconstitué traité par 8% de verre(1)

Nombre de coup	17		24		32	
Masse de la tare	15,5	20,4	20,8	20,9	21,4	21,1
M de tare+sol hum	18	22,3	23,1	22,9	23,4	23,8
M de tare+sol sec	17,6	22,1	22,9	22,8	23,1	23,6
Masse de l'eau	0,56	0,45	0,38	0,35	0,19	0,26
Masse de sol sec	2,1	1,7	2,1	1,9	1,7	2,5
Teneur en eau	26,67	26,47	18,10	18,42	11,18	10,40
Moyenne	26,57		18,26		10,79	
wp(%)	18,54					
Ip	6,36					

Tableau III-58: limites plasticité du sol reconstitué traité par 8% de verre (1)

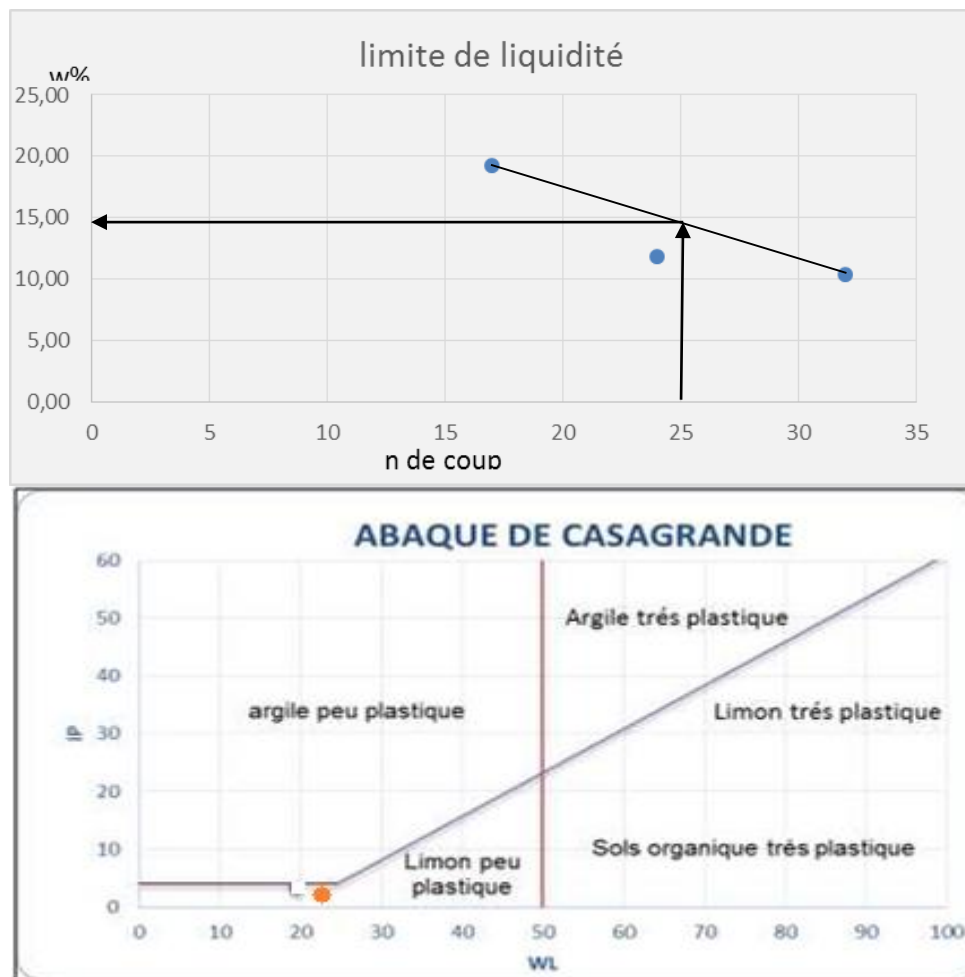


Figure III-26: Position du sol reconstitué traité par 8% de verre testé dans l'abaque de Casagrande

❖ *Essais2* $w_l=14.99\%$

M=(g), w=(%)

Nombre de coup	19		27		36	
Masse de la tare	50,1	51,5	51,7	51,7	50,2	49,8
M de tare+sol hum	66,3	65,3	59,1	63,8	64,8	66,4
M de tare+sol sec	63,1	61,8	57,6	61,6	61,2	65,8
Masse de l'eau	2,32	2,03	0,86	1,45	1,25	1,89
Masse de sol sec	13	10,3	5,9	9,9	11	16
Teneur en eau	17,85	19,71	14,58	14,65	11,36	11,81
Moyenne	18,78		14,61		11,59	

Tableau III-59: Teneurs en eau moyennes du sol reconstitué traité par 8% de verre(2)

Nombre de coup	16		24		37	
Masse de la tare	8,6	8,9	8,8	8,7	8,9	23,6
M de tare+sol hum	10,7	10,9	10,7	10,8	10,5	27,1
M de tare+sol sec	10,5	10,7	10,6	10,6	10,3	26,8
Masse de l eau	0,57	0,49	0,31	0,33	0,12	0,36
Masse de sol sec	1,9	1,8	1,8	1,9	1,4	3,2
Tenur en eau	30,00	27,22	17,22	17,37	8,57	11,25
Moyenne	28,61		17,30		9,91	
wp(%)	18,61					
Ip	6,40					

Tableau III-60: limites plasticité du sol reconstitué traité par 8% de verre (2)

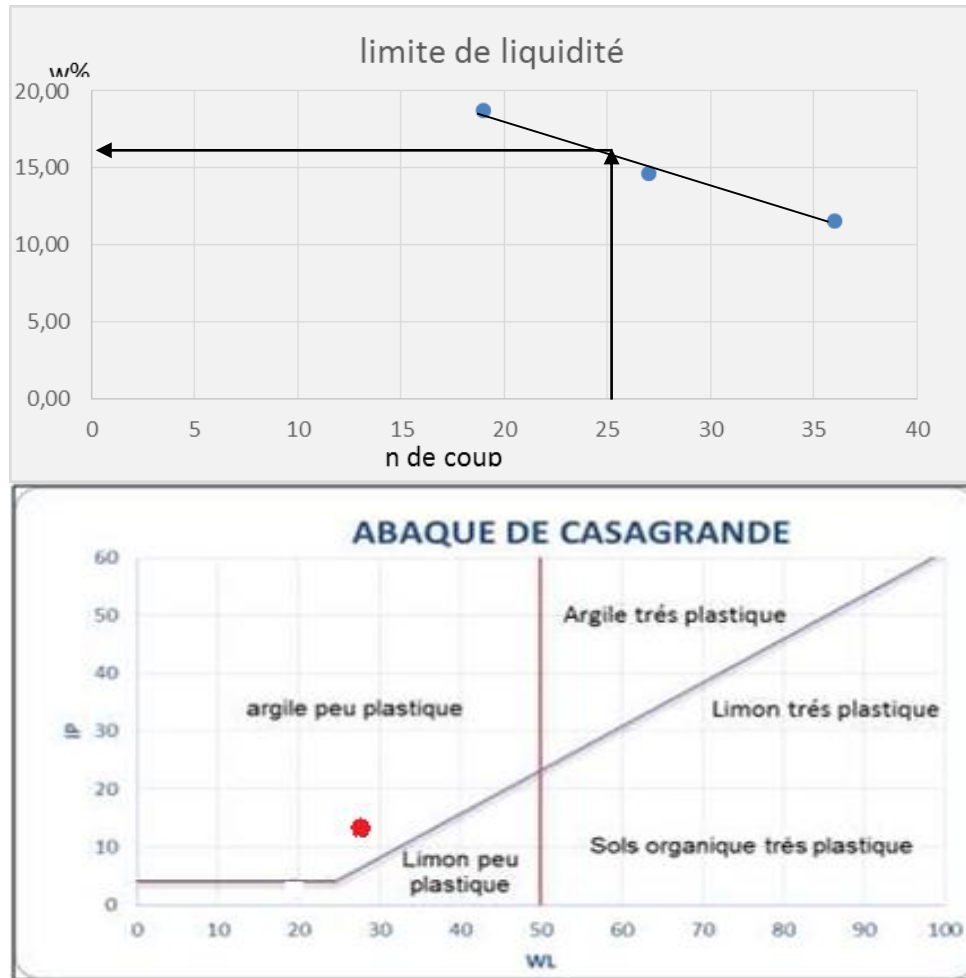


Figure III-27: Position du sol reconstitué traité par 8% de verre testé dans l'abaque de Casagrande

VII-limites de liquidité-la méthode de cône de pénétration

a-Le sol reconstitué non traite

MESURES	1	2	3	4
Enfoncement mm	18,78	19,54	22,21	23,33
teneur en eau%	29,3	27,23	20,65	19,32

Tableau III-63 : limites liquidité du sol reconstitué non traité

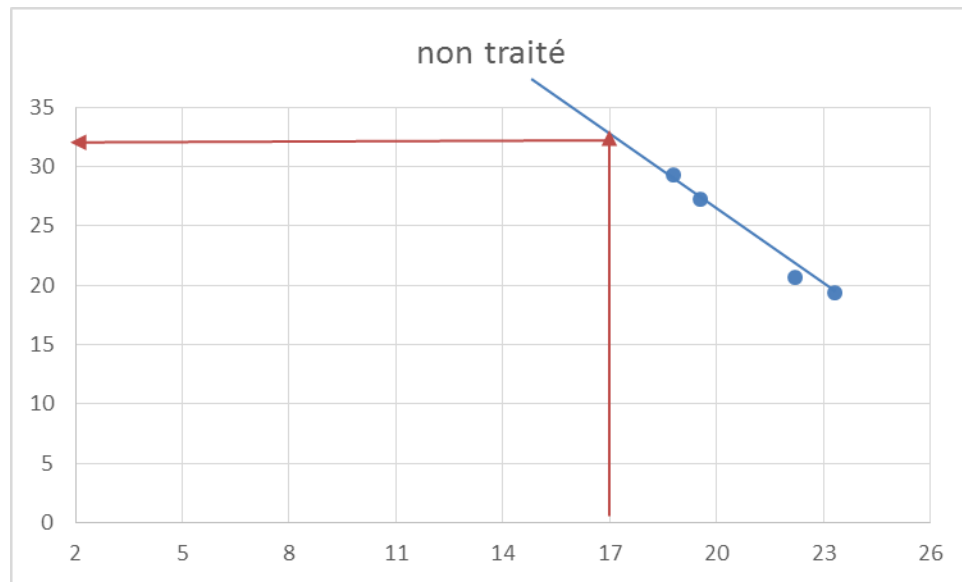


Figure III-29: procès –verbal d’essai de sol reconstitué non traité

VII-2- le sol reconstitué traite par 2% de verre

MESURES	1	2	3	4
Enfoncement mm	16,24	17,41	21,56	26,3
teneur en eau%	31,2	28,3	23,3	20,2

Tableau III-64 : limites liquidité du sol reconstitué traité par 2% de verre

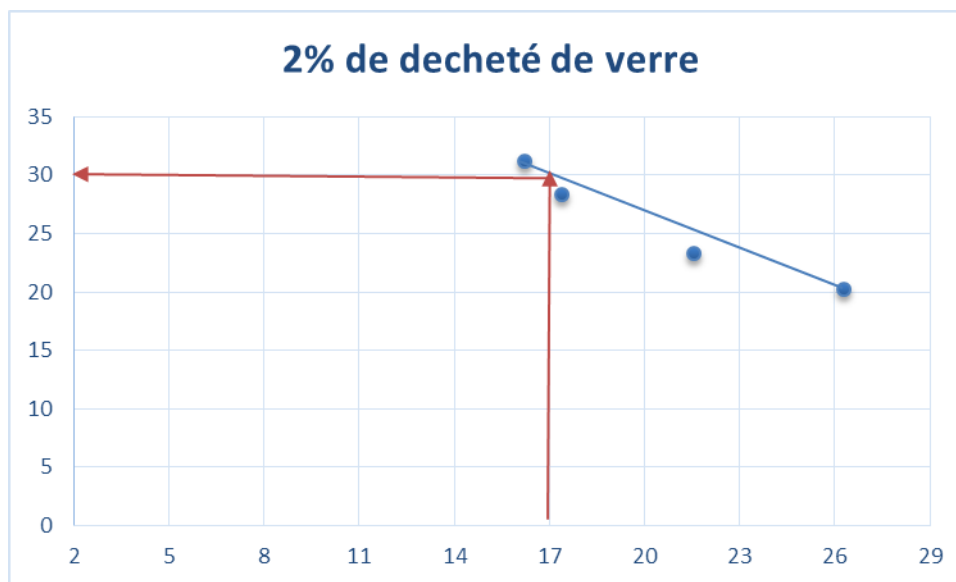


Figure III-30: procès –verbal d’essai de sol reconstitué traité par 2% de verre

VII-4-le sol reconstitué traite par 3% de verre

MESURES	1	2	3	4
Enfoncement mm	17,25	20,67	24,23	27,2
teneur en eau%	30,25	26,74	23,51	17,23

Tableau III-65: limites liquidité du sol reconstitué traité par 3% de verre

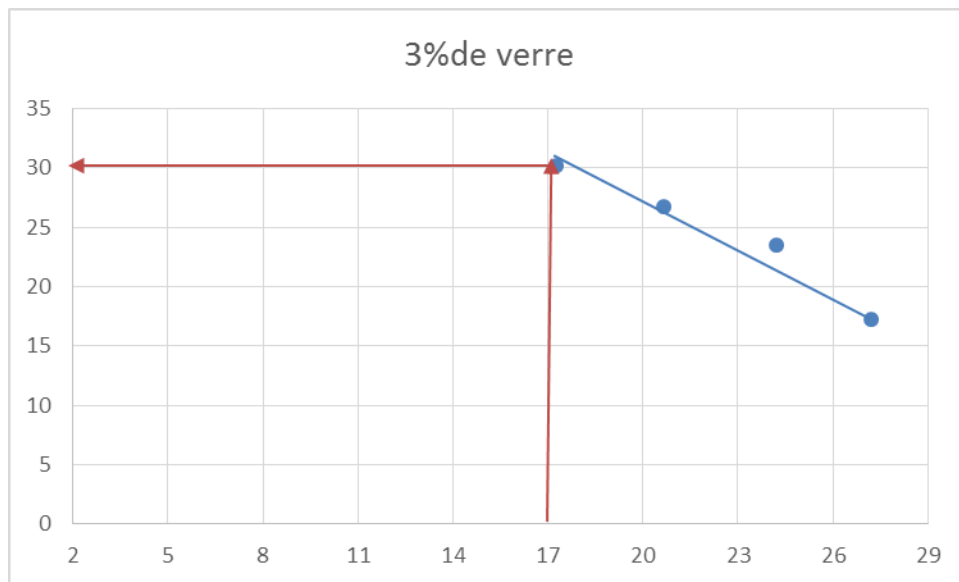


Figure III-31: procès –verbal d’essai de sol reconstitué traité par 3% de verre

VII-5-le sol reconstitué traite par 4% de verre

MESURES	1	2	3	4
Enfoncelement mm	15,15	18,15	25,36	27,48
teneur en eau%	32,65	30,25	26,58	23,67

Tableau III-66: limites liquidité du sol reconstitué traité par 4% de verre

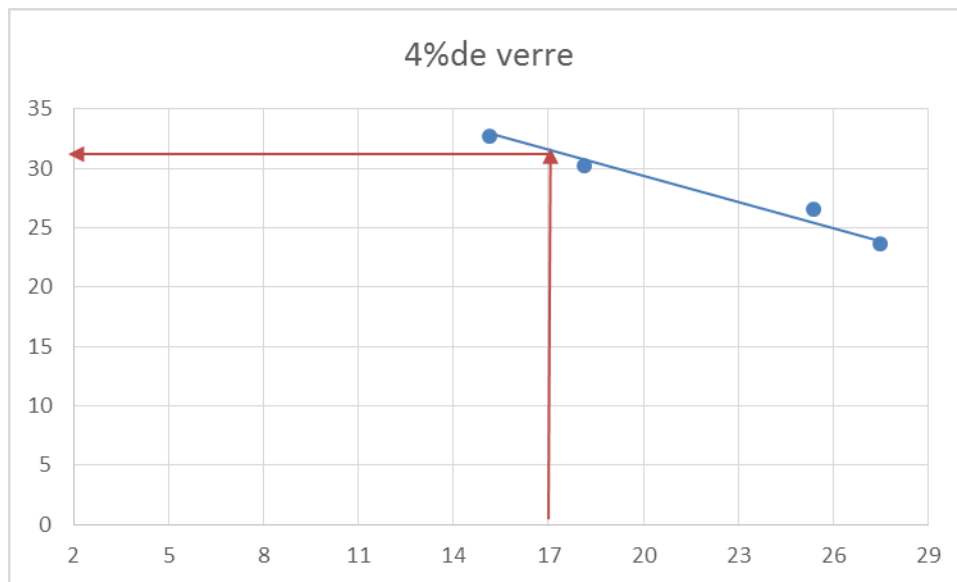


Tableau III-32: limites liquidité du sol reconstitué traité par 4% de verre

VII-6-le sol reconstitué traite par 5% de verre

MESURES	1	2	3	4
Enfoncement mm	17,2	18,7	21,65	26,28
teneur en eau%	29,3	27,2	25,3	20,3

Tableau III-67: limites liquidité du sol reconstitué traité par 5% de verre

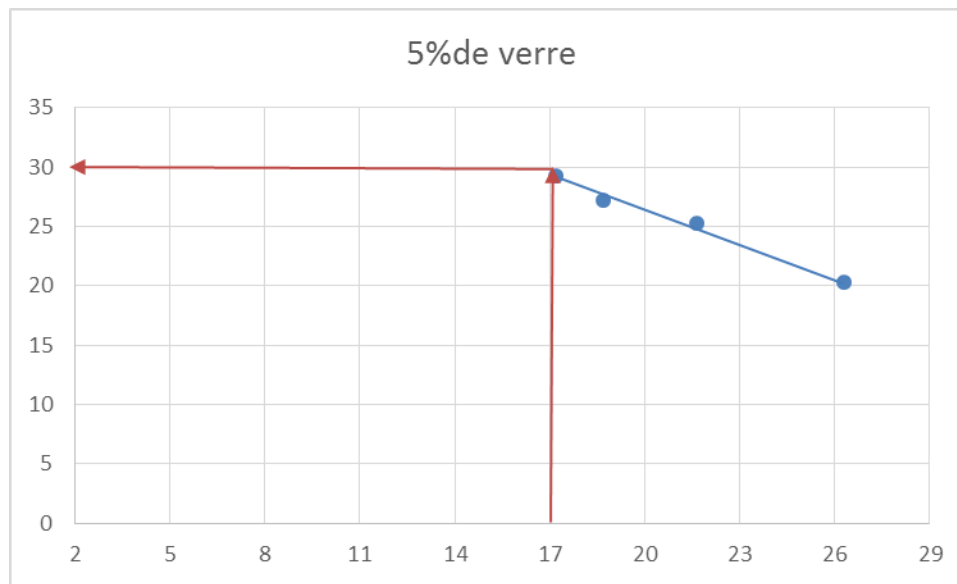


Figure III-33: procès –verbal d’essai de sol reconstitué traité par 5% de verre

VII-7- le sol reconstitué traite par 6%de verre

MESURES	1	2	3	4
Enfoncement mm	16,24	17,41	18,64	27,2
teneur en eau%	30,1	28,3	26,3	16,21

Tableau III-68: limites liquidité du sol reconstitué traité par 6% de verre

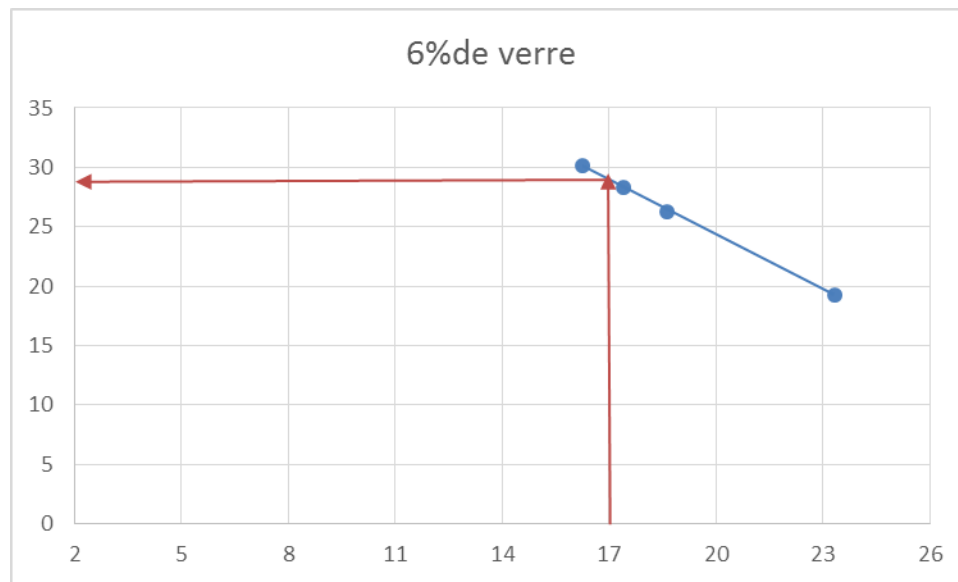


Figure III-34: procès –verbal d’essai de sol reconstitué traité par 6% de verre

VII8- le sol reconstitué traité par 7% de verre

MESURES	1	2	3	4
Enfoncement mm	15,14	17,68	20,11	25,28
teneur en eau%	32,21	30,24	24,32	19,2

Tableau III-69: limites liquidité du sol reconstitué traité par 7% de verre

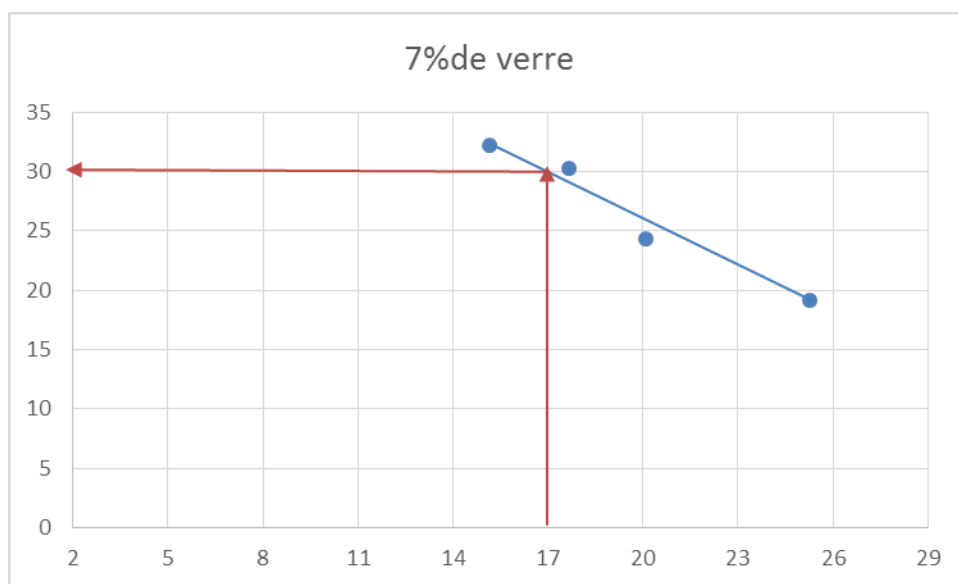


Figure III-35: procès –verbal d’essai de sol reconstitué traité par 7% de verre

VII-9- le sol reconstitué traité par 8%de verre

MESURES	1	2	3	4
Enfouissement mm	17,54	17,2	21,71	32,77
teneur en eau%	30,23	29,65	24,32	18,2

Tableau III-70-limites liquidité du sol reconstitué traité par 8% de verre

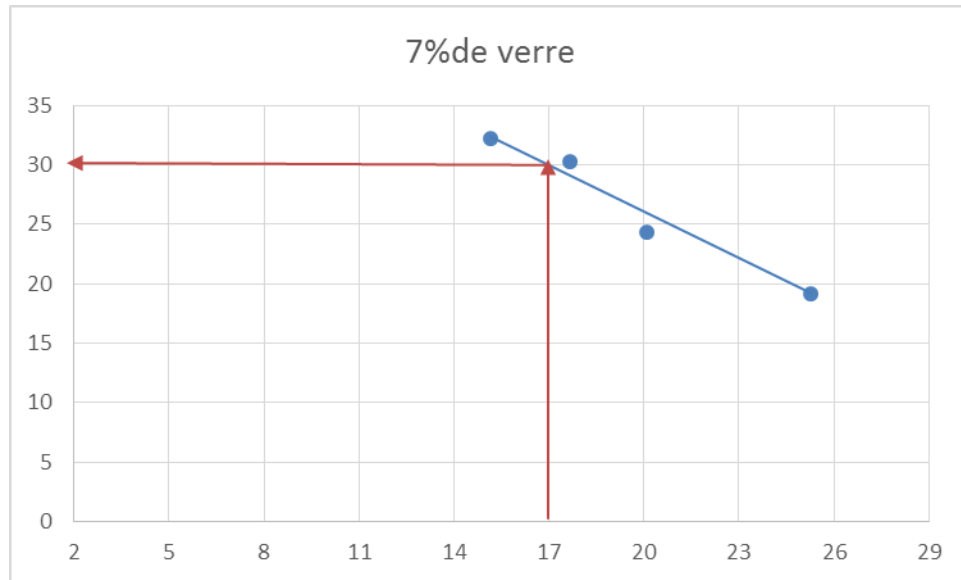


Figure III-34: *procès –verbal d’essai de sol reconstitué traité par 8% de verre*

CHAPITRE IV

DISCUSSION DES RESULTATS

CHAPITRE IV

DISCUSSION DES RESULTATS

I- Résultats des caractéristiques d'identification :

1-Analyse granulométrique :

Nous avons effectué en premier lieu des séries d'essais d'identification physiques dans le but d'avoir une plateforme de connaissances nécessaire à l'élaboration de la suite des essais principaux, ces essais donnent une idée sur l'état de chaque sol. Le programme d'essais a comporté en premier lieu l'analyse granulométrique de sables et le sol reconstitué dont les résultats sont représentés sur **les figures III-1 jusqu'à III-2**. Cet essai a été réalisé sur un échantillon de sol reconstitué a laboratoire avec 80% de sable passant au tamis de 2mm, et d'une fraction argileuse inférieure à 80µm avec un pourcentage de 20% de la masse du sol. Le coefficient d'uniformité $C_u = 2.78$ pour le sable et 9.44 pour le sol reconstitué, le coefficient de continuité = 1.12 pour le sable et 2.64 pour le sol reconstitué par conséquent, nous classons le sable dans le cas de sable propre mal gradué. Et le sol reconstitué dans le cas de sable propre bien gradué

.

2-La masse volumique :

Les masses volumiques absolues sont déterminées et données par les tableaux **III-5 à III-8**. Dans ces résultats nous pouvons constater que la masse volumique absolue du sol reconstitué est de 3.06g/cm³ et la masse volumique absolue du kaolin est de 2.06g/cm³. La masse volumique absolue du sable est de 2.64g/cm³ et la masse volumique absolue du déchet de verre

Puis les masses volumiques apparentes sont présentées dans les **tableaux III-9 à III-11**. Dans ces résultats nous pouvons constater que la masse volumique apparente du sol reconstitué est de g/cm³ 1.538 et la masse volumique apparente du kaolin est de 0.651 g/cm³. et la masse volumique apparente du déchet de verre est de 0.804 g/cm³.

3- Essai de bleu de méthylène :

Les résultats de l'essai au bleu de méthylène du kaolin puis de sol reconstitué et le sable sont représentés dans les tableaux **III-12**, jusqu'à **III-14**. donnent un VBS égal à 1.83 pour le kaolin, 1.36 pour le sol reconstitué et 0.44 pour le sable, ces résultats peuvent classer notre kaolin et le sol reconstitué dans les catégories des [Seuil distinguant les sols sablo-limoneux des sols sablo argileux et sol insensible à l'eau] respectivement.

4-Equivalent de sable :

Les résultats de l'essai d'équivalent de sable sont illustrés par les tableaux **III-4**, qui donnent un ESV égale à 73.93, et ESP égale à 70.71 ce résultat qui peut classer notre sable dans la catégorie du sable propre.

Nous avons aussi dans le cadre de l'identification physique des sols déterminé

. Les résultats de l'essai Proctor sont, pour la teneur en eau et la masse volumique sèche optimales, égales respectivement à 8% et 0,88t/m³.

. Les résultats de l'essai Proctor sont traités par 6% de verre, pour la teneur en eau et la masse volumique sèche optimales, égales respectivement à 8% et 0,705t/m³.

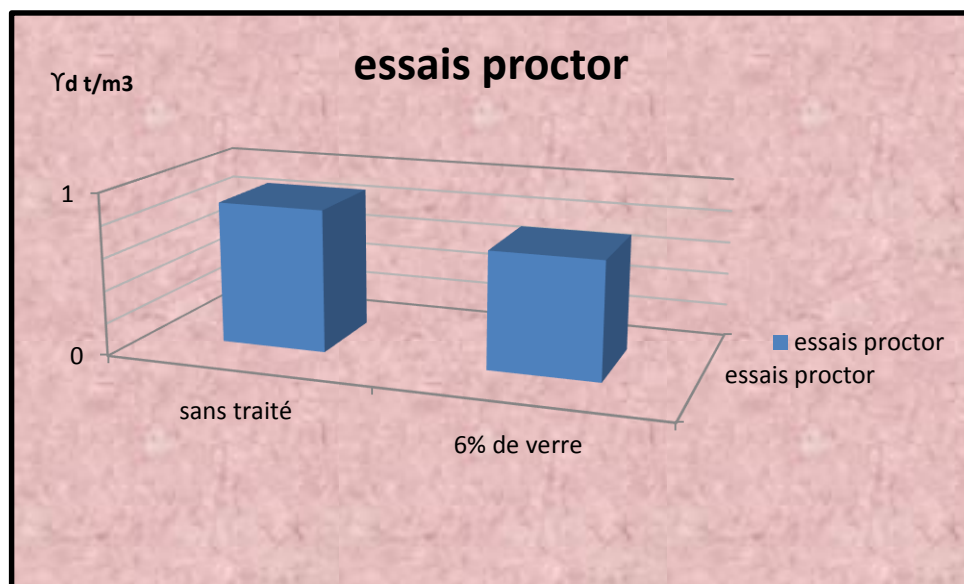


Figure VI-1 : histogramme présenté la densité sec en fonction de la traité de déchet de verre.

On observe dans l'essai de Proctor, la densité γ_d diminue dans le cas traité

limites d'Atterberge ou de consistance suivant la norme (NF P94-051), et les résultats sont

❖ **le cas non traité**

présentés dans les **tableaux III-17** jusqu'à **III-20**, et illustrées par les **figures III-6** jusqu'à **III-7**. D'après ces résultats nous pouvons constater que la limite de liquidité du sol reconstitué Non traité et celle du kaolin est de 25.33 et 44.52 respectivement, et leur indice de plasticité I_p est 3.28 et 13.22. Ces valeurs, d'après la classification proposée par l'abaque de Casagrande, classe sol testé comme limons peu plastiques. De même pour la valeur de l'indice de plasticité, ce sol est classé entre non plastique et peu plastique.

❖ **Le cas traite**

Présentés dans les tableaux **III-21** jusqu'à **III-56**, et illustrées par les figures **III-8** jusqu'à **III-29**. d'après les résultats de sol traité on différent pourcentage de déchet de verre (2%.3%.4%.5%.6%.7%.8%). et après d'étude de caractéristique physique de ce sol. On observe une augmentation dans l'indice de vide avec l'augmentation de le pourcentage de déchet de verre.. Ce sol classé entre non plastique et peu plastique

dechét de verre	2%	3%	4%	5%	6%	7%	8%
essais 1	1,62	2,82	4,67	4,7	5,41	6,1	6,36
essais 2	2,72	3,85	4,19	4,91	5,68	5,46	6,4

Tableau III-1 : les valeurs d'IP après le traitement par le déchet de verre

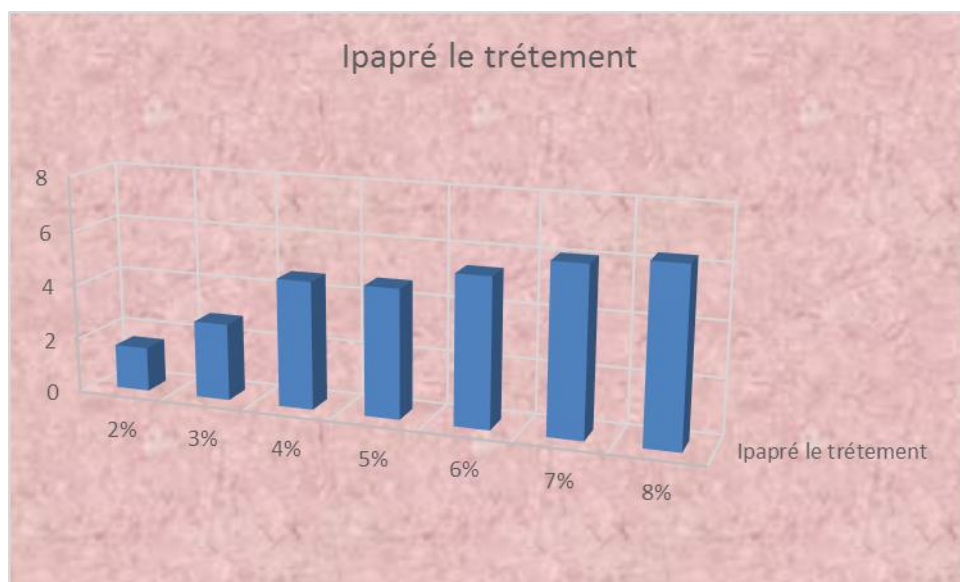


Figure VI-2 : histogramme d'IP avec le traitement de déchet essais 1

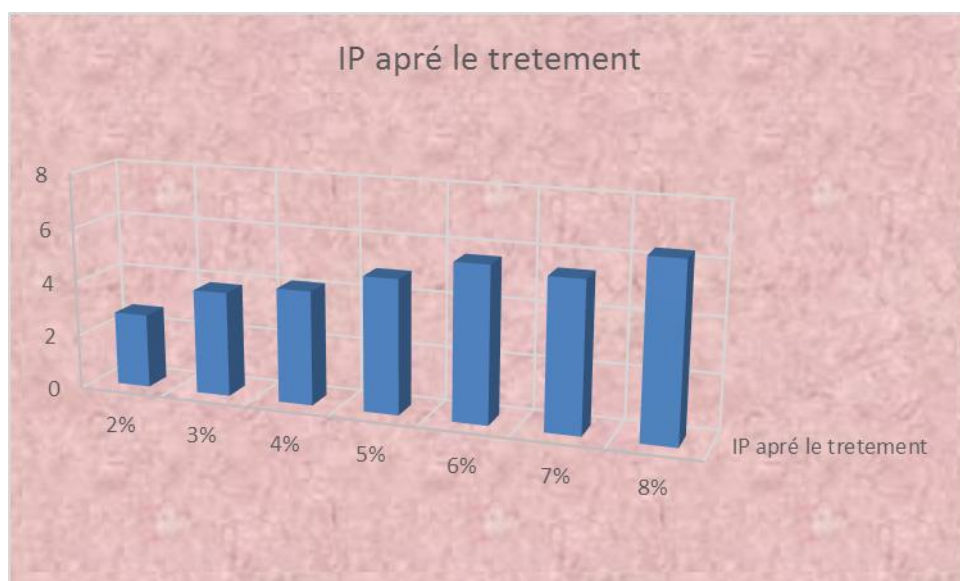
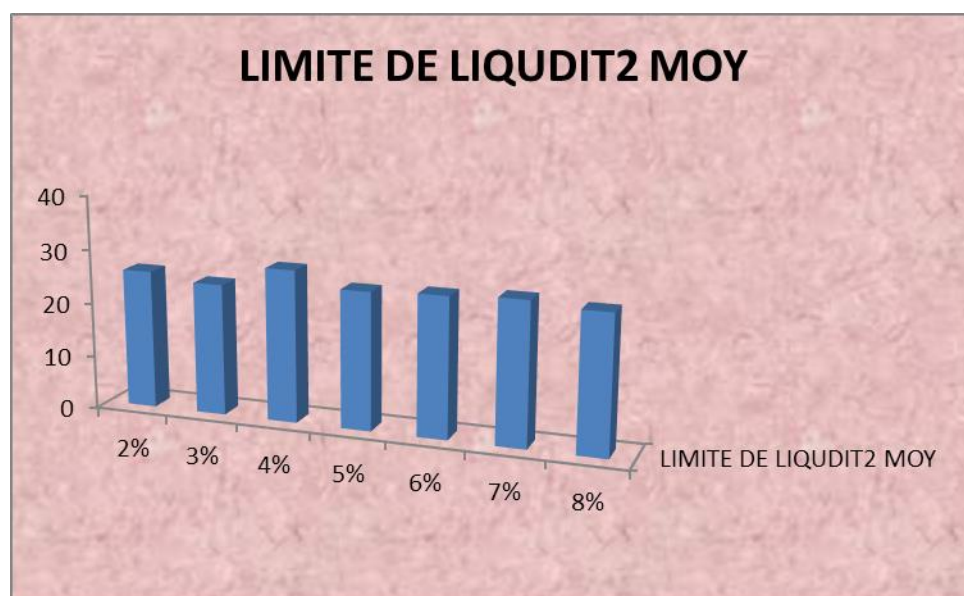


Figure VI-3 : histogramme d'IP avec le traitement de déchet essais 2

❖ **La limite de liquidité par le con de pénétration :**

Nous avons effectué les essais sur le sol reconstitué traité par des pourcentages de déchet de verre (2%.3%.4%.5%.6%.7%.8%). ont observé un peu augmentation de la limite de liquidité.et en même temps on observe une augmentation de teneur en eau en fonction enfouissement.



FigureVI-4 : limite de liquidité moyenne

Conclusion générale

Recommandations et perspectives

L'objet de cette étude est de déterminer l'effet de l'ajout de déchets de verre sur l'amélioration des caractéristiques physiques d'un sol affaissable, situé en zone arides ou semi-arides. Pour se faire, on propose un programme expérimental qui nous a permis de caractériser de manière satisfaisante le comportement des sols affaissables après l'ajout d'un certain pourcentage de déchet de verre.

Dans cette étude, nous avons donné dans un premier temps un aperçu général sur l'état de connaissance du sol. Puis l'effet du traitement sur les caractéristiques physiques de notre sol.

D'après les résultats qu'on a obtenus, nous pouvons conclure que le déchet de verre est un moyen de traitement efficace car il augmente la plage de l'indice de plasticité chose qui a un effet positif sur la diminution de l'effondrement des sols d'affaissables.

RECOMMANDATIONS ET PERSPECTIVES :

Cette étude est concentrée sur les sols reconstitués reconnus affaissables. Les recommandations tirées de cette étude sont résumées ci-dessous :

-Notre étude est limitée (et cela par limitation de temps et manque du matériel), parce qu'on a utilisé seulement trois teneurs de déchet de verre, bien qu'elles nous ont donné des résultats positifs mais il serait mieux de compléter ce travail par l'étude d'autres caractéristiques physiques du sol.

-Cette étude a été suivie sur un sol reconstitué ; bien qu'il soit reconnu affaissable, étant donné les essais effectués et ses caractéristiques géotechniques, mais il est souhaitable de confirmer ces résultats sur des échantillons de sols naturels traités.

Références Bibliographique

Mohamed Salah NOUAOURIA (STRUCTURE ET COMPORTEMENT DE L'AFFAISSEMENT DU LOESS) Thèse de DOCTORAT D'ETAT Département de Génie Civil

Option GEOTECHNIQUE UNIVERSITE BADJI MOKHTAR-ANNABA Septembre 2005

densification des sols affaissables par compactage dynamique ph. Liausu ménard sol traitement j .p. iorio Bouygues ofshore w.f. Hartley ground engineering and piling

laouar Mohamed Salah : (prédiction des sols a effondrement brusque par des méthodes expérimentales) thèse de doctorat en sciences option mécanique des sols université hadj Lakhdar –Batna.

] Khaldi Abdelhamid : (étude de l'influence de la granulométrie sur le taux et l'amplitude de l'affaissement des sols par la méthode de double consolidation) thèse de magister université hadj Lakhdar –Batna 2011.

DENSIFICATION DES SOLS AFFAISSABLES PAR COMPACTAGE DYNAMIQUE Ph : Liausu Ménard Sol traitement J .P. Iorio Bouygues Ofshore W.F. Hartley Grounds Engineering and Piling.

FAO. 2005 : Utilisation des engrais par culture en Algérie. FAO Rome, 61 p.

<http://www.oocities.org/mbenahcene/traitement.htm> (détermination de la

perméabilité d'un sol affaissable a l'état naturel) du diplôme d'ingénieur d'état en génie civil Aute : Benahcene Mounir Date : 17.07.2001

Hocine Ziani :(Étude de l'influence du gradient hydraulique sur l'affaissement de la structure des sols a effondrement brusque en utilisant la méthode double consolidation) thèse de magister université hadj Lakhdar –Batna

BOUDRAF TAREK :(ETUDE COMPARATIVE DES METHODES PREDICTIVES DES SOLS AFFAISSABLES) THÈME De Master Université De Mohamed Boudiaf –M'sila 2013.

Dudley J.H. (1970). Review of collapsing soils. J. Soil Mech. FdnEngng,

Am. Sot. Civ. Engrs 96, SM3. 925-947

Références Bibliographique

: AYADAT et BELOUAHRI. (1998), Ait Ammar R. La migration de particules fines comme approche d'explication du mécanisme de l'effondrement des sols [J] Revue Française de Géotechnique. 83:1-9

BOUDRAFTAREK :(*ETUDECOMPARATIVEDESMETHODESPREDICTIVES DES SOLS AFFAISSABLES*) THÈME De Master Université De Mohamed Boudiaf –M'sila 2013.

Hocine Ziani :(*Étude de l'influence du gradient hydraulique sur l'affaissement de la Structure des sols a effondrement brusque en utilisant la méthode double consolidation*) thèse De magister université hadj Lakhdar –Batna 2011.

Référence des sites web :

www.mpl.ird.fr [<https://www.mpl.ird.fr/suds-en-ligne/desertif/carte.html>]

MOHCEN MOSSAAB ET MOHAMMED TAYEB-AYA., El M'Rara

S'affaisse. Posté Le : 12/05/2010 www.vitamineca.com .

www.cosmovisions.com [<http://www.cosmovisions.com/kaolin.html>] .

[http : //www.wikipédia.com](http://www.wikipédia.com).

Références Bibliographique

Normes :

- **NF P 94 -056 AFNOR** (1996) *Norme Française : Sols Reconnaissance et Essais – Analyse granulométrique, méthode de tamisage par voie humide.*
- **NF P 94 -051 AFNOR** (1993) *Norme Française : Sols : Reconnaissance et Essais – Détermination des limites d’Atterberg – Limite de liquidité à la coupelle – Limite de plasticité au rouleau.*
- **NF P 94 -068 AFNOR** (1993) *Norme Française : Sols : Reconnaissance et Essais –Détermination de la valeur de bleu de méthylène d’un sol par l’essai à la tâche.*
- **NF P 94 -093 AFNOR** (1999) *Norme Française : Sols : Détermination des références de compactage d'un matériau Essai Proctor normal — Essai Proctor modifié*
- **NF P 94 -054 AFNOR** (novembre 1995) *Norme Française : sol : Reconnaissance et Essais – détermination de la limite de liquidité par le cône de pénétration*



Scorpion - Dev-Point