



**RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET
POPULAIRE MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT
SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE**



**UNIVERSITÉ IBN KHALDOUN DE TIARET
FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUÉES
DÉPARTEMENT DE GÉNIE CIVIL**

Mémoire

Pour l'obtention du diplôme de :

Master

Spécialité : Génie Civil

Option : Structures

Présenté par :

BOUZIANE BACHIR

FENDIL AMIRA

Thème :

***Etude du comportement des argiles stabilisées
avec des déchets de verre***

Soutenu publiquement, le 15/07/2021, devant le jury composé de :

M.SERBAH Boumedienne

M.BEKKI HADJ

M^{elle} RENNAK Zohra

M^{me} DRAOUI Aicha

Président

Rapporteur

Examineur

Examineur

Année Universitaire 2020/2021

Remerciements

Tout d'abord nous remercions notre bon Dieu qui nous a donné le courage et la patience à fin de réaliser ce modeste travail

❖ Nous exprimons toute notre gratitude à Monsieur le Professeur **BEKKI.H**, pour l'effort fourni, les conseils prodigués, sa patience et sa persévérance dans le suivi.

❖ Nous adressons également nos remerciements, à tous nos enseignants, qui nous ont donnée les bases de la science,

❖ Nous remercions très sincèrement, les membres de jury d'avoir bien voulu accepter de faire partie de la commission d'examineur,

❖ Nous tenons à remercier l'équipe de laboratoire des travaux publics de l'ouest,

❖ A toute personne qui a participé de près ou de loin pour l'accomplissement de ce modeste travail

Dédicaces

*J*e dédie du fond du cœur ce modeste travail à :

❖ *M*es très chers parents et je leurs dit merci pour tous ce que vous aviez fait pour moi.

❖ *M*es très chers frères et ma petit sœur *Malak*.

❖ *M*es très chers amis de promotion « structure » et « vois et ouvrage d'art ».

Bachir.....

Dédicaces

*Je dédie avec grand honneur ce modeste travail
À celle qui m'a arrosé de tendresse et d'espoir, la mère
des sentiments fragiles qui m'a béni grâce à ses
prières, ma douce mère.*

*Celui qui m'a appris à être qui je suis aujourd'hui, à
combattre tous obstacles, mon défunt père R.E.P.*

À mes sœurs qui ont été des piliers de soutiens.

*À ma famille, et plus surtout mon cher oncle
Bensedik Nordin qui a été toujours présent.*

À mes professeurs et mon encadreur.

À mes amis qui n'ont jamais douté de ma réussite.

À ma promotion de 2^{ème} année Master Génie civil.

À mon binôme.

*À toute personne qui un jour a voulu me voir où je
suis aujourd'hui et a tant voulu ma réussite.*

Amira...

Résumé

En Algérie, les déchets de verre représentent des quantités non négligeables et peuvent être valorisés dans plusieurs applications géotechniques, tels que les travaux routiers. D'autre part, les travaux de terrassements engendrent, généralement, des quantités de déblais argileux n'ayant pas les spécifications techniques requises pour être utilisées en remblais.

On propose à travers ce sujet d'étudier l'influence de l'ajout de déchets de verre sur l'évolution des caractéristiques mécaniques des argiles stabilisées avec du verre broyé (particules inférieures à $63\ \mu\text{m}$). Le travail consiste à réaliser des essais oedométriques et de cisaillement à la boîte de Casagrande sur l'argile naturelle prise comme référence et des mélanges (argile-verre broyé) à différents pourcentages. Il a été trouvé que l'ajout du verre à l'argile diminue les indices de gonflement et de tassement et modifie les caractéristiques intrinsèques de l'argile.

Abstract

In Algeria, glass waste represents significant quantities and can be recovered in several geotechnical applications, such as road works. On the other hand, earthworks generally generate enormous amounts of clay that do not have the technical specifications required to be used in backfill.

The present work aims to study the influence of the addition of waste glass on the evolution of the mechanical characteristics of clays stabilized with crushed glass (particles smaller than 63 μ m). The work consists of carrying out oedometric and direct shear tests on natural clay taken as a reference and mixtures (clay-crushed glass) prepared at different percentages.

It has been found that the addition of glass to clay decreases the swelling and settling rates and changes the intrinsic characteristics of the clay.

ملخص

في الجزائر ، تمثل نفايات الزجاج كميات كبيرة يمكن استعادتها في العديد من المشاريع الجيوتقنية ، مثل أعمال الطرق من ناحية أخرى ، تنتج أعمال الحفر عمومًا كميات هائلة من التربة التي لا تحتوي على المواصفات الفنية المطلوبة لاستخدامها في الردم .

الموضوع المقترح يتمثل في دراسة تأثير إضافة نفايات الزجاج على تطور الخصائص الميكانيكية للطين المستقر مع الزجاج المطحون (الجسيمات الأصغر من 63 ميكرومتر) . يتمثل العمل في إجراء اختبارات القياس و القص في صندوق كازاغراندي على الطين المأخوذ كمرجع و خلأئط (الزجاج المسحوق مع الطين) بنسب مختلفة .

لقد وجدنا ان اضافة الزجاج الى الطين يقلل من معدلات الانتفاخ و دك التربة و يغير الخصائص الجوهريية للطين .

SEMMAIRE

Liste des tableaux	VI
Liste des figures.....	VII
Liste de symbole	XI
Introduction générale.....	- 1 -
Chapitre I: recyclage de verre	
I.1.Introduction:	- 4 -
I.2.Généralités sur le verre:	- 4 -
I.2.1.l'Historique du verre:	- 4 -
I.2.2.Définition du verre:	- 5 -
a) Définition opérationnelle du verre:.....	- 5 -
b) Définition structurale du verre:	- 5 -
I.2.3.Fabrication du verre:.....	- 5 -
I.2.4.Les propriétés du verre:	- 6 -
➤ Propriétés physiques:	- 6 -
➤ Propriétés thermiques:.....	- 7 -
➤ Propriétés chimiques:.....	- 7 -
I.2.5.Les différents types de verre:.....	- 8 -
- Les verres sodocalciques:	- 8 -
- Les verres borosilicates:	- 8 -
- Le verre de silice:	- 8 -
- Les verres au plomb:.....	- 9 -
I.3.Généralités sur le recyclage:	- 9 -
I.3.1.définition du recyclage:	- 9 -
I.3.2.Les principaux avantages du recyclage:	- 9 -

I.3.3. Les inconvénients notables du recyclage:	- 10 -
I.3.4.les différents types de recyclage:	- 11 -
I.3.5.Les différents cycles de recyclages:	- 11 -
I.3.6.Recyclage du verre d'emballage (calcin):	- 11 -
I.3.7.Processus de recyclage du verre:	- 13 -
I.3.7.1.Pré tri:	- 13 -
I.3.7.2.Collecte:	- 13 -
I.3.7.3.Tri et conditionnement:	- 13 -
I.3.8.Domaines de recyclage des déchets de verre:	- 14 -
I.3.9. DISPONIBILITE ET QUANTIFICATION DES VERRE à RECYCLER:	- 15 -
I.4.Conclusion:	- 18 -

Chapitre II: comportement des argiles et techniques de stabilisation

II.1.INTRODUCTION:	- 20 -
II.2.LES ARGILES:	- 20 -
II.3.Structure des argiles:	- 22 -
II.4.Texture d'une argile:	- 23 -
II.5.Les différentes catégories d'argiles:	- 24 -
II.6.Les différents types d'argiles:	- 26 -
II.6.1.La kaolinite:	- 26 -
II.6.2.La montmorillonite:	- 27 -
II.6.3.L'illite:	- 29 -
II.7.Formation:	- 30 -
II.8.Activité des argiles:	- 31 -
II.9.Propriétés des minéraux argileux:	- 32 -
II.9.1.La surface spécifique:	- 32 -
II.9.2.La capacité de gonflement et d'adsorption d'eau:	- 33 -
II.9.3.Capacité d'échange cationique:	- 34 -

II.10. Caractérisation simplifiée de l'aléa:	- 34 -
II.10.1. Approche générale des mouvements de terrain:	- 34 -
II.10.2. Caractéristiques propres au phénomène de retrait gonflement des argiles:	- 36 -
II.11. STABILISATION CHIMIQUE DES ARGILES:	- 37 -
II.11.1. Traitement aux liants hydrauliques:	- 37 -
II.11.2. Traitement au ciment:	- 37 -
II.11.3. Traitement à la chaux:	- 37 -
II.11.4. Autre techniques de stabilisation:	- 38 -
II.11.4.1. Drainage:	- 38 -
II.11.4.2. Substitution:	- 39 -
II.11.4.3. Application de fortes pressions:	- 39 -
II.11.4.4. Compactage:	- 39 -
II.11.4.5. Prehumidification:	- 39 -
II.11.4.6. Traitement thermique:	- 39 -
II.11.4.7. Utilisation de fondations et d'édifices spéciaux :	- 39 -
II.12. Conclusion:	- 41 -

Chapitre III: Les essais mécaniques

III.1. Introduction:	- 43 -
III.2. L'essai Oedométrique:	- 43 -
III.2.1. Principe et courbes de consolidation et de compressibilité:	- 43 -
III.2.2. Description de l'appareillage:	- 46 -
III.3. L'essai de cisaillement à la boîte:	- 47 -
III.3.1. Sol pulvérulents:	- 47 -
III.3.2. Sol cohérents:	- 48 -
1)-Essai consolidé drainé (C.D):	- 48 -
2)-Essai non consolidé non drainé (U.U):	- 49 -

3)-Essai consolidé non drainé (C.U):	50 -
III.3.3.Principe de l'essai:	50 -
III.3.4.Appareillage:	51 -
III.4.L'essai triaxial:	52 -
III.4.1.Principe de l'essai:	54 -
III.5.Conclusion:	57 -

chapitre IV: Présentation des Essais

IV.1.Introduction:	59 -
IV.2.Prélèvement de l'argile naturelle:	59 -
IV.3.Etude expérimentale:	61 -
IV.3.1.Essais d'identifications:	61 -
IV.3.1.1.Les limites d'ATTERBERG (NFP 94-051):	61 -
IV.3.1.2.Analyse granulométrique:	64 -
IV.3.1.3.Essai bleu de méthylène NFP 94-068:	66 -
IV.3.1.4 : Essai d'évaluation de carbonates (NA-2789) CaCO_3 :	68 -
IV.3.1.5: Détermination de la teneur en sulfates (NA-16002-5042):	69 -
IV.3.1.6: Poids spécifiques des gains solides NA255/1990:	69 -
IV.3.1.7: Détermination de la teneur en eau pondérale des sols NFP94-050-91:	70 -
IV.3.2.Essais mécaniques:	70 -
IV.3.2.1.Essai Proctor normal (NA 5262, NF P 94-093):	70 -
IV.3.2.2.1.Essai de cisaillement direct:	74 -
IV.3.2.2.2 : Essais de cisaillement direct:	76 -
IV.3.2.3.Essai Œdométriques XP P 94-090-1:	88 -
IV.3.2.4.Essai de compression simple selon la norme européenne (EN 13286-41):	95 -
IV.4.Conclusion:	100 -

chapitre V: Analyse et Interprétation des Résultats

V.1.Introduction :	- 101 -
V.2.Essais Oedométriques :	- 102 -
V.3.Essais de cisaillement direct:	- 104 -
V.3.1. Essais non consolidés non drainés (UU) :	- 104 -
V.3.2. Essais consolidés drainés (CD) :	- 104 -
V.4. Analyse DRX :	- 106 -
V.5. Conclusion :	- 107 -
Conclusions générales et Perspectives.....	109
Références bibliographiques.....	112
Annexes.....	116

Liste des tableaux

Tableau.I.1 : Composition (en % en masse) des verres industriels.....	6
Tableau.I.2: Quantité des déchets produits par habitant (d'après rapport sur l'État de l'environnement en Algérie.....	15
Tableau.I.3: quantités des principaux déchets recyclables.....	17
Tableau.I.4: Capacité de recyclage.....	17
Tableau.II.1 : Classification des phyllo silicates, d'après.....	25
Tableau.II.2 : Valeurs de la surface spécifique de quelques familles argileux.....	33
Tableau.IV.1: Résultats de l'essai de limite de liquidité de l'argile naturelle.....	62
Tableau.IV.2: Résultats de l'essai la limite de plasticité de l'argile naturelle.....	62
Tableau.IV.3: Limite de liquidité à la coupelle de Casagrande.....	63
Tableau.IV.4: Les résultats des d'Atterberg.....	63
Tableau.IV.5: Résultats de l'essai de VBS pour l'argile.....	67
Tableau.IV.6: Tableau de classification des sols fins (GTR).....	68
Tableau.IV.7: Taux de carbonates présents dans l'argile.....	68
Tableau.IV.8: Résultats de l'essai de teneur en sulfates.....	69
Tableau.IV.9: Les Résultats de l'essai Proctor réalisé sur l'Argile Naturelle.....	72
Tableau.IV.10: résultat de l'essai Proctor normal.....	73
Tableau.IV.11: résultat de l'essai Proctor normal.....	74
Tableau.IV.12: résultat de l'essai Proctor normal.....	74
Tableau.IV.13: Les résultats des essais de compression simple pour (10 jours).....	97
Tableau IV.14: Les résultats des essais de compression simple pour (14 jours).....	98
Tableau.IV.15: Les résultats des essais de compression simple pour (21 jours).....	99

Liste des figures

Figure.I.1: Image montrant le déchet de verre destiné au recyclage.....	12
Figure.I.2: les étapes de collecte du verre.....	14
Figure.I.3: composition déchets ménagers en Algérie.....	16
Figure.II.1: Représentation (a) d'un tétraèdre et d'une couche tétraédrique et (b) d'un octaèdre et d'une couche octaédrique.....	21
Figure.II.2: Plans anioniques (O ²⁻ , OH ⁻) de la charpente d'un feuillet selon les références La coordinence de ces groupes est de 4 dans le plan A et de 6 dans les plans B et C.....	23
Figure.II.3: Texture des sols gonflants.....	24
Figure.II.4: Photographies MEB de texture matricielle (a); Argile Verte de Romainville) et texture agrégée (b); Argile de Bavent).....	24
Figure.II.5: Structure schématique de la kaolinite.....	26
Figure.II.6: Vue isométrique de la structure atomique de la kaolinite.....	27
Figure.II.7: Schéma de la structure de la montmorillonite.....	28
Figure.II.8: Schéma de la structure 3 D de la montmorillonite.....	28
Figure.II.9: Schéma de la structure de l'illite.....	29
Figure.II.10: Schéma du Processus de formation de l'argile.....	30
Figure.II.11: Mouvements de terrain principaux	36
Figure.III.1: courbes de consolidation.....	44
Figure.III.2: courbe de compressibilité dans le plan ($e - \log \sigma'$).....	45
Figure.III.3: courbe de compressibilité dans le plan ($\varepsilon - \sigma'$).....	46
Figure.III.4: cellule odomètre type Terzaghi.....	47
Figure.III.5: Interprétation graphique de l'essai consolidé drainé.....	49
Figure.III.6: Interprétation graphique de l'essai non consolidé non drainé.....	49
Figure.III.7: Interprétation graphique de l'essai consolidé non drainé.....	50
Figure.III.8: schéma de la boîte de cisaillement.....	51

Figure.III.9: Schéma de la cellule Bishop.....	53
Figure.III.10: Critères de plasticité en contraintes lors de trois différents types d'essais triaxiaux CD- CU- UU.....	54
Figure.III.11: essai sous pression de l'eau.....	55
Figure.III.12: résultat de la contrainte axiale.....	55
Figure.III.13: la rupture de l'échantillon provoqué par cisaillement.....	56
Figure.III.14: la courbe des contraintes de cisaillement	56
Figure.III.15: le plan Mohr.....	57
Figure.IV.1: Carrière d'argile de Medrissa.....	59
Figure.IV.2: carte de localisation de la carrière d'argile de Medrissa.....	60
Figure.IV.3: prélèvement d'argile.....	60
Figure.IV.4: Détermination des limites d'Atterberg.....	61
Figure.IV.5: Limite de liquidité à la coupelle de Casagrande.....	63
Figure.IV.6: classification des sols fins, Diagramme de plasticité (selon L.C.P.C)	64
Figure.IV.7: Dispositif de l'essai de sédimentométrie.....	65
Figure.IV.8: Courbe granulométrique de l'argile.....	66
Figure.IV.9 : Les étapes de l'essai de bleu de méthylène.....	67
Figure.IV.10: Dispositif d'essai de la teneur en sulfates.....	69
Figure.IV.11: les étapes de l'essai Proctor normal	71
Figure.IV.12: Courbe Proctor Normal pour l'argile naturelle.....	73
Figure.IV.13 : Appareil de cisaillement rectiligne.....	75
Figures.IV.14: les étapes de l'essai de cisaillement à la boîte de casa grande	76
Figure.IV.15 : Résultats des essais de cisaillement (UU) réalisés sur les éprouvettes de l'argile naturelle.....	77
Figure.IV.16 : Courbe intrinsèque relative à l'argile naturelle.....	78
Figure.IV.17 : Résultats des essais de cisaillement (UU) réalisés sur les éprouvettes de l'argile +10% de verre	79

Figure.IV.18: Courbe intrinsèque relative à l'argile naturelle + 10% verre.....	79
Figure.IV.19: Résultats des essais de cisaillement (UU) réalisés sur les éprouvettes de l'argile +20% de verre.....	80
Figure.IV.20: Courbe intrinsèque relative à l'argile naturelle + 20% verre.....	81
Figure IV.21 : Résultats des essais de cisaillement (UU) réalisés sur les éprouvettes de l'argile +30% de verre	82
Figure.IV.22: Courbe intrinsèque relative à l'argile naturelle + 30% verre.....	82
Figure.IV.23: courbe de consolidation.....	83
Figure.IV.24: Résultats des essais de cisaillement (CD) réalisés sur les éprouvettes de l'argile naturelle	84
Figure.IV.25: Courbe intrinsèque relative à l'argile naturelle.....	85
Figure.IV.26: Résultats des essais de cisaillement (CD) réalisés sur les éprouvettes de l'argile naturelle +10% de verre.....	86
Figure.IV.27: Courbe intrinsèque relative au mélange d'argile naturelle et 10% de verre....	86
Figure.IV.28: Résultats des essais de cisaillement (CD) réalisés sur les éprouvettes de l'argile naturelle +30% de verre.....	87
Figure.IV.29: Courbe intrinsèque relative au mélange d'argile naturelle et 30% de verre...88	
Figure.IV.30: Dispositif de l'essai Œdométrique.....	88
Figure IV.31 : les étapes de l'essai Œdométriques	89
Figure.IV.32: Courbe de compressibilité de l'argile naturelle.....	91
Figure.IV.33: Courbe de compressibilité de l'argile +10% de verre.....	92
Figure.IV.34: Courbe de compressibilité d'argile avec 20% verre.....	93
Figure.IV.35: Courbe de compressibilité d'argile avec 30% verre.....	94
Figure.IV.36: Presse utilisée pour l'essai de compression.....	95
Figure.IV.37: les étapes de l'essai de compression simple.....	96

Figure.V.1: Courbes de compressibilité des différents échantillons.....	102
Figure.V.2: Variation de l'indice de gonflement en fonction du dosage en verre.....	103
Figure.V.3: Variation de l'indice de compression en fonction du dosage en verre.....	103
Figure.V.4: Variation de la cohésion C_u en fonction du dosage en verre.....	104
Figure.V.5: Variation de la cohésion en fonction du dosage en verre.....	105
Figure.V.6: Variation de l'angle de frottement en fonction du dosage en verre.....	105
Figure.V.7: Spectre de réponse obtenu par DRX de l'argile naturelle.....	106
Figure.V.8: Spectre de réponse DRX des différents mélanges.....	107

Liste des notations et symboles :

W : teneur en eau exprimé en pourcentage

WL : la limite de liquidité exprimée en pourcentage

WP : la limite de plasticité exprimé en pourcentage

IP : Indice de plasticité (sans dimension)

Yd: Densité sèche (t/m³)

VBS : est la valeur de bleu de méthylène d'un sol

Ys : poids volumique des grains solide g/cm³

U.U : Essai non consolidé non drainé

C.D : Essai consolidé drainé

σ_N : la contrainte normale moyenne appliquée à l'éprouvette, exprimée en kilopascals

c : la cohésion, exprimé en kilopascals

φ : l'angle de frottement, exprimé en degré

Vmax : la vitesse maximale de déplacement relatif des deux demi-boîtes, exprimé en micromètres par minutes

t₁₀₀ : la durée conventionnelle de consolidation de l'éprouvette sous un effort verticale, exprimé en minute

Ct : l'indice de compression (sans dimension)

Cg : l'indice de gonflement (sans dimension)

Cp : La contrainte pré consolidation

Cv : coefficient de consolidation vertical, exprimé en mètres carrés par seconde

t : le temps de tassement, exprimé en seconde

Tv : le facteur temps pour la consolidation vertical (un paramètre sans dimension).

hD : la hauteur de drainage de la couche de sol, exprimé en mètres

Δh : la variation de la hauteur de l'éprouvette, exprimée en millimètres

Δe : la variation de l'indice des vides

e : l'indice des vides de l'éprouvette pendant l'essai

e_0 : l'indice des vides du sol en place

E_{oed} : module Œdométriques, exprimé en kilopascals ou en mégapascals

R_c : La résistance à compression , exprimé en (**MPa**)

A_c : est la surface de section transversale de l'éprouvette, exprimée en millimètres carrés

F : est l'effort maximal supporté par l'éprouvette exprimé en (N)

DRX : Diffraction des rayons X

Introduction générale

Des centaines de milliers de tonnes de déchet de verre peuvent être récupérés chaque année en Algérie. Le recyclage du verre pour la fabrication de nouveaux produits nécessite un tri sélectif qui fait augmenter le prix de recyclage, d'où l'intérêt d'utiliser le déchet de verre dans d'autres domaines, tel que les remblais routiers.

D'autre part, les matériaux argileux ont un comportement variable en fonction de leur état hydrique. En effet, l'argile est dure et cassante lorsqu'elle est asséchée, plastique lorsqu'elle est humide. Ces modifications de consistance peuvent s'accompagner de fortes augmentations de volume (phénomène de gonflement) lorsque la teneur en eau augmente, et inversement, rétractation (phénomène de retrait) en période de déficit pluviométrique marqué. Les désordres aux constructions pendant une sécheresse intense sont dus aux tassements différentiels du sol de fondation, pouvant atteindre plusieurs centimètres. L'hétérogénéité des mouvements entre deux points de la structure va conduire à une déformation pouvant entraîner fissuration, voire rupture de la structure.

On se pose la question ; que sont les déchets de verre ? Et quelle est le comportement de l'argile et les techniques de sa stabilisation? Quelle sont les essais mécaniques ? Et est-t-il possible de fusionner l'argile et les déchets de verre pour obtenir une stabilisation de l'argile?

A travers ce mémoire de Master, nous visons à étudier le comportement mécanique des mélanges argiles-déchets de verre afin de mettre en évidence l'intérêt de cette technique de stabilisation.

En réalisant principalement des essais mécaniques (Eodométrique et cisaillement à la boîte), notre travail purement expérimental, englobe l'étude de l'évolution performances mécaniques d'une argile gonflante suite à l'ajout de déchet de verre.

Le matériau étudié est une argile rougeâtre ramenée du gisement d'approvisionnement de la briqueterie de SARL GRECO, situé dans la commune de Medrissa. Tandis que le déchet de verre est récupéré chez un vitrier installé dans la ville de Tiaret.

Le mémoire est structuré en cinq chapitres :

Le premier chapitre, nommé (Recyclage du verre), est consacré à la définition, l'histoire, la fabrication du verre et le recyclage de ses déchets.

Quand au deuxième chapitre (Comportement des argiles et techniques de stabilisations), on présentera les argiles en détaillant la structure, les propriétés, les types et le comportement de cette catégorie de sols.

Le troisième chapitre (Les essais mécaniques), comportera la présentation et la définition des essais mécaniques.

Dans le chapitre quatre (Partie expérimentale), on présentera les essais effectués dans le laboratoire des travaux publics (LTPO), et au département de Génie Civil (GC).

Le cinquième chapitre est réservé à l'analyse et l'interprétation des résultats trouvés.

Pour conclure, on présentera les principales conclusions et résultats aux quelles on est parvenus ainsi que les perspectives quant à la continuité de ces travaux de recherche

CHAPITRE I
RECYCLAGE DU VERRE

I.1.Introduction:

Récemment, le paysage urbain s'est enrichi avec des conteneurs de récupération des déchets recyclables, tels que : le verre, le carton et le plastique, ce qui témoigne "la prise de conscience des citoyens" de l'intérêt de cette opération de collecte des déchets.

Dans le présent chapitre, on présentera le matériau verre ainsi que son intérêt sur le plan écologique et environnemental.

I.2.Généralités sur le verre:

I.2.1.l'Historique du verre:

Le verre a été l'un des premiers matériaux utilisés par les hommes préhistoriques pour réaliser des outils tranchants : l'obsidienne, verre d'origine volcanique est composé à environ 80 pour cent de silice. La première fabrication de verre par l'homme date de 12000 ans avant J.-C. : Il s'agit d'émaux décorant les céramiques. Puis vient l'élaboration de flacons par la technique du noyau (sorte de moulage) 1500 avant J.-C., et le soufflage au premier siècle. Enfin, la fabrication du verre plat par coulée sur une table métallique fut découverte en France au XVIIème siècle. Ce procédé, modernisé et automatisé (laminage, polissage,...), fut utilisé jusqu'à l'invention de la technique dite « float », qui consiste à couler le verre sur un bain d'étain. Cette technique rend inutile le laminage et le polissage.

Dans le domaine scientifique, jusqu'au XXème siècle, la recherche a porté essentiellement sur la composition du verre. En particulier, l'invention d'instruments d'optique a fortement contribué à l'avancée des connaissances sur le verre (ajout d'oxyde de plomb pour augmenter l'indice de réfraction, diversification des compositions des verres d'optique par ajout d'oxyde de bore et de phosphore). L'intérêt pour la structure du verre ne date en revanche que de la seconde moitié du XXème siècle, fortement stimulée par l'apparition de technologies modernes mettant en œuvre des verres (télécommunications par fibres optiques, xérographie, par exemple) (Chligui, 2010).

I.2.2.Définition du verre:

Le mot verre peut prendre des significations variées. Si dans le langage courant ce terme sert à désigner un matériau fragile et transparent, bien connu depuis l'antiquité, dans le langage scientifique sa portée est plus vaste mais aussi plus difficile à définir avec précision. Donc, pour définir un verre, on a le choix entre une définition opérationnelle et une définition structurale.

a) Définition opérationnelle du verre:

« Le verre est un solide obtenu par figeage d'un liquide qui n'a pas cristallisé ». Cette définition restreint le terme verre aux seuls produits obtenus par trempe d'un liquide.

b) Définition structurale du verre:

« Le verre est un solide non cristallin ». Suivant cette voie, les termes : « solide non cristallin », « solide amorphe » et « verre » sont synonymes. En réalité, ni l'une ni l'autre de ces définitions n'est pleinement satisfaisante. La définition structurale bien que simple en apparence est très générale. Si le verre est bien un solide non cristallin, tout solide non cristallin n'est pas nécessairement un verre. C'est le cas des gels, qui peuvent parfois conduire à des verres par un traitement approprié (Djiridi, 2019).

Dans notre travail, le terme verre fait référence au matériau verre, de point de vue structure.

I.2.3.Fabrication du verre:

Le verre peut être produit à partir de matière minérale vierge (silice) ou de verre broyé de récupération (calcin). La fabrication du verre comporte quatre stages. En premier temps, les matériaux bruts sont fondus, ensuite le verre en fusion est raffiné afin d'obtenir l'homogénéité, il est alors façonné, et enfin passe au procédé d'anéanti pour éliminer des stresses développés pendant le façonnement. Pour des verres particuliers, des étapes supplémentaires sont parfois appliquées, comme le durcissement et la décoloration. La majorité de ces étapes sont effectuées, aujourd'hui, à la machine (Glass Works, 1982).

Tableau I.1 : Composition (en % en masse) des verres industriels (d'après Zarzycki, 1982)

	SiO ₂	B ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	CaO	MgO
Verre plat	72,5	-	1,5	13	0,3	9,3	3
Verre à bouteilles	73	-	1	15	-	10	-
Pyrex	80,6	12,6	2,2	4,2	-	0,1	0,05
Fibre de verre	54,6	8,0	14,8	0,6	-	17,4	4,5

I.2.4. Les propriétés du verre:

Le verre est la seule matière minérale solide que l'on puisse produire à des dimensions et sous des formes quelconques tout en conservant sa transparence

➤ **Propriétés physiques:**

-La transparence:

Mais il peut être opaque ou opalescent.

-La dureté:

Seuls les diamants et le carbure de tungstène le rayent. Le verre le plus dur est le verre de Bohême et le cristal est le plus tendre.

-La densité:

Elle dépend des composants ; elle est d'environ 2,5. Cela signifie qu'un mètre cube pèse environ deux tonnes et demie ou qu'une feuille d'un mètre carré et d'un millimètre d'épaisseur pèse 2,5 kg.

-La résistance et l'élasticité:

la cassure du verre est liée à sa flexion et à sa résistance au choc. Il casse là où le métal se tord. Contrairement, sa résistance à la compression est importante : il faut une pression de 10 tonnes pour briser un centimètre cube de verre.

➤ **Propriétés thermiques:**

-La dilatation:

C'est un très mauvais conducteur de chaleur. Il se brise s'il subit un brusque changement de température car les différentes parties du verre ne se réchauffent pas en même temps. Son coefficient de dilatation est faible, ce qui lui confère de nombreuses applications : il sert d'isolant thermique (laine de verre). On retrouve presque les mêmes coefficients que certains métaux d'où l'exécution de soudures verre-métal. Ce coefficient varie selon la composition.

-La conductivité:

C'est un mauvais conducteur (environ 500 fois moins que le cuivre); on l'utilise comme isolant électrique. C'est aussi un bon isolant acoustique suivant l'épaisseur de la feuille. Ceci n'est pas le cas à chaud car il devient conducteur à partir de 250°C.

➤ **Propriétés chimiques:**

-L'action des acides:

Les acides décomposent la silice, le plus rapide est l'acide fluorhydrique qui permet de graver en profondeur le verre plaqué. Le verre peut donc être dissout.

-L'action de l'eau:

L'eau agit sur les silicates qui, en se décomposant, forment un dépôt en surface qui devient peu à peu opaque ; le verre perd de sa transparence.

-L'action de l'air:

Les silicates alcalins se combinent avec l'acide carbonique contenu dans l'air ce que donne un dépôt blanchâtre à la surface du verre (ZEGHICHI et ZOUBIRI, 2016).

I.2.5. Les différents types de verre:

-Les verres sodocalciques:

La famille dont l'usage est le plus répandu est la famille sodocalcique. Actuellement, elle représente plus de 90 % des verres fabriqués dans le monde. Le verre sodocalcique est généralement composé de 71 à 75 % de dioxyde de silicium (SiO_2), principalement extrait du sable, de 12 à 16 % d'oxyde de sodium, soude Na_2O contenu dans le carbonate de sodium Na_2CO_3 , de 10 à 15 % d'oxyde de calcium, CaO contenu dans le calcaire CaCO_3 , et de petites quantités d'autres composants, destinés à conférer au verre des propriétés spécifiques. Dans certaines compositions, un certain pourcentage d'oxyde de calcium ou d'oxyde de sodium est remplacé, respectivement, par de l'oxyde de magnésium, MgO , et de l'oxyde de potassium, K_2O .

-Les verres borosilicates:

Le verre au borosilicate contient du trioxyde de bore (B_2O_3), ainsi qu'un pourcentage plus élevé de dioxyde de silice. La composition habituelle comprend entre 70 % et 80 % de SiO_2 , de 7 à 15 % de B_2O_3 , entre 4% et 8 % de Na_2O ou K_2O , et de 2 à 7 % d'oxyde d'aluminium Al_2O_3 . Ce type verres ayant de composition présentent une haute résistance à la corrosion chimique, ont un faible coefficient de dilatation entraînant une grande résistance au choc thermique et de bonne caractéristique électrique. Parmi les applications de ce type de verre figurent les composants de procédés chimiques, les équipements de laboratoire, les récipients utilisés en pharmacie, l'éclairage, les récipients pour cuisson, les portes de fours et les plaques de cuisson.

-Le verre de silice:

Il est obtenu par fusion de quartz ou de sable très purs sans addition d'aucun fondant, il contient au moins 96 % de silice. Le verre de silice réunit des qualités exceptionnelles sur le plan de la résistance au choc thermique, de la transparence aux rayonnements et d'inertie chimique.

-Les verres au plomb:

L'oxyde de plomb peut être utilisé pour remplacer la plupart de l'oxyde de calcium, dans la composition, pour obtenir ce type de verre, qui est communément appelé verre au plomb. La composition courante de ce type de verre est de 54 à 65 % de SiO_2 , de 25 à 30 % de PbO , de 13 à 15% Na_2O ou K_2O , ainsi que d'autres composants secondaires. Ce type de formule, avec un contenu d'oxyde de plomb supérieur à 24%, permet d'obtenir un verre à haute densité, doté d'un indice de réfraction élevé, et donc, d'une excellente brillance et sonorité, pouvant être facilement travaillé et modelé, avec des formes et des décorations différentes. Parmi ces produits figurent les verres à boire de grande qualité, des carafes, des bols et des articles de décoration (BOUABDALLAH,).

I.3.Généralités sur le recyclage:**I.3.1.définition du recyclage:**

C'est réduire l'extraction des matières premières, non renouvelables, provenant de l'autre bout du monde. Le recyclage permet de lutter contre le réchauffement climatique : Recycler c'est économiser de l'énergie (KEDDAM, 2015).

I.3.2.Les principaux avantages du recyclage:**➤ Le recyclage minimise la pollution:**

Toutes les formes de pollution dans le monde moderne émanent des déchets industriels. Le recyclage de ces déchets industriels, tels que les plastiques, les canettes et les produits chimiques, contribue considérablement à réduire les niveaux de pollution, car ces déchets sont réutilisés au lieu d'être simplement jetés de manière imprudente.

➤ Protège l'environnement:

Le grand avantage du recyclage des déchets est qu'ils jouent un grand rôle dans la protection environnementale de la manière la plus équilibrée qui soit. Bien que de nombreux arbres soient abattus chaque jour, le papier recyclé fabriqué à partir d'arbres spécifiques est continuellement utilisé pour réduire la déforestation. Cet exemple classique démontre que

d'autres ressources naturelles peuvent être recyclées et rendues utiles pour préserver l'environnement.

➤ **Le recyclage minimise le réchauffement climatique:**

Lors de l'élimination des déchets, d'énormes quantités de matériaux sont brûlées, entraînant l'émission de vastes gaz à effet de serre tels que le dioxyde de carbone, le soufre et l'azote, qui contribuent au changement climatique et au réchauffement de la planète.

Le processus de recyclage implique une combustion minimale et les déchets sont transformés en matériaux réutilisables avec un impact nul ou minimal sur l'environnement. L'ensemble du processus de traitement et de fabrication des produits à partir de déchets produit peu de gaz à effet de serre, car les industries de recyclage de déchets brûlent peu de combustibles fossiles.

I.3.3. Les inconvénients notables du recyclage:

➤ **Coûts d'investissement initiaux élevés:**

Le recyclage n'est pas toujours rentable. Construire une nouvelle unité de recyclage des déchets nécessite beaucoup de capital. Les coûts d'accompagnement comprennent l'achat de différents types de véhicules utilitaires, la mise à niveau de l'unité de recyclage, la gestion des déchets, l'élimination des produits chimiques et la formation des locaux en organisant des programmes et des séminaires utiles.

➤ **Les sites de recyclage sont toujours peu hygiéniques, dangereux et inesthétiques:**

Les endroits où tous les types de déchets sont empilés constituent un terrain propice à la formation de débris et à la propagation de maladies infectieuses. Les produits chimiques nocifs provenant de ces déchets peuvent également être dangereux.

En plus de causer une pollution massive, l'ensemble du processus de recyclage pose des risques pour la santé des personnes responsables du recyclage de ces déchets. En outre, si de tels déchets entrent en contact avec de l'eau, il en résulte une formation de produit nocif qui finit par polluer les masses d'eau potable

I.3.4.les différents types de recyclage:

Il existe trois familles de techniques de recyclage (chimique, mécanique et organique)

- **Chimique:** utilise une réaction chimique pour traiter les déchets, par exemple pour séparer certains composants.
- **Mécanique:** est la transformation des déchets à l'aide d'une machine, par exemple pour broyer.
- **Organique:** consiste, après compostage ou fermentation, à produire des engrais et du carburant tel que le biogaz.

I.3.5.Les différents cycles de recyclages:

On a deux types du cycle de recyclage :

- **Recyclage avec destruction:** On peut utiliser l'énergie dégagée lors de la destruction du matériau.
- **Recyclage avec valorisation:** C'est l'aptitude d'un matériau à être réintroduit dans un cycle de fabrication (keddam, 2015).

I.3.6.Recyclage du verre d'emballage (calcin):

Le calcin est du verre récupéré à partir de déchets (ménagers et assimilés, etc...) ou directement à partir de chutes de fabrication (Figure I.1). Il est d'abord trié et nettoyé pour éliminer toutes les impuretés. Ensuite, avant d'être introduit avec les matières premières afin de former le lit de fusion, il est broyé très finement.



Figure.I.1: Image montrant le déchet de verre destiné au recyclage

L'utilisation du calcin présente de nombreux avantages pour l'environnement, ainsi que pour le verrier. En effet :

- elle ne nécessite pas l'extraction de matières premières naturelles et évite la consommation de 60 Kg de fuel par tonne de calcin utilisé pour l'extraction des matières premières naturelles ;
- elle évite le transport de matières premières naturelles sur de longues distances pour transporter le calcin sur de plus courtes distances. Elle limite donc la pollution atmosphérique due au déplacement ;
- elle limite le rejet dans l'atmosphère de polluants (dioxyde de carbone et dioxyde de soufre) causé par la fabrication du verre à partir de matières premières naturelles, les matières se trouvant déjà sous la forme d'oxyde (moins 200 kg de CO₂ rejeté par tonne de calcin utilisé)
- elle diminue la température de fusion⁷ (le calcin doit être chauffé à une température plus basse que les matières premières naturelles pour être fondu). Elle permet donc l'économie de 40 kg de fuel par tonne de calcin utilisé (DECOTTIGNIES, 2008).

I.3.7.Processus de recyclage du verre:

Le verre d'emballage ménager doit subir plusieurs étapes de traitement avant de pouvoir être recyclé.

I.3.7.1.Pré tri:

Un premier tri est effectué par le consommateur qui dépose le verre dans des conteneurs de proximité mis à sa disposition par la municipalité, ce qui n'existe pas en Algérie.

I.3.7.2.Collecte:

Les conteneurs de proximité sont vidés dans des camions-benne pour être acheminés vers un centre de traitement. Le verre y subit un premier tri manuel qui permet d'enlever les objets de taille importante qui pourraient s'y trouver mêlés, des bouteilles ou des sacs en plastique par exemple.

I.3.7.3.Tri et conditionnement:

Au centre de traitement, le verre subit une série de tris

-Tris mécaniques pour éliminer les métaux ferreux ou non-ferreux (acier, aluminium)

-tri optique au laser identifie et extrait les matériaux infusibles

-soufflage permet d'extraire les éléments légers : les bouchons, le papier

-broyage et transformation en calcin, calibré à la demande des verriers pour refaire des emballages en verre (amrous et belkada, 2015).

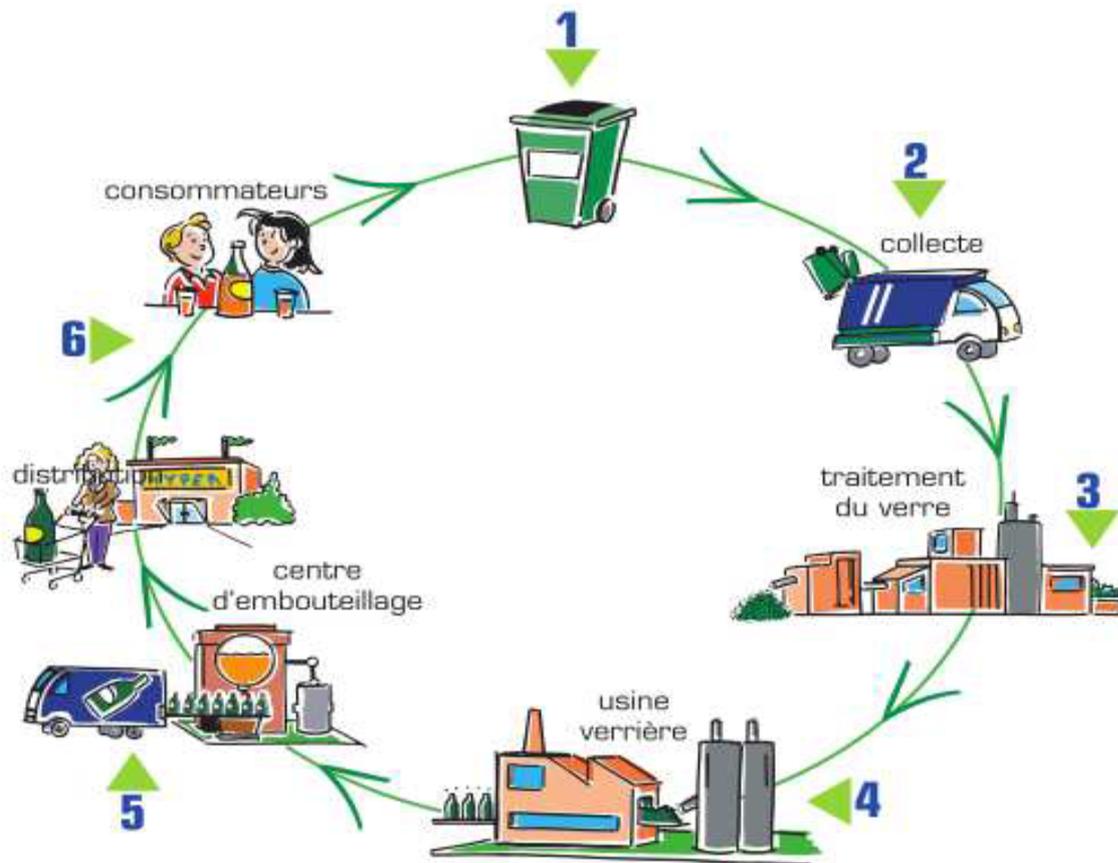


Figure.I.2: les étapes de collecte du verre

I.3.8. Domaines de recyclage des déchets de verre:

Le recyclage du verre d'emballage possède de nombreux avantages, et celui notamment d'être utilisé à l'infini. Le verre après broyage peut être réutilisé sous plusieurs formes dans plusieurs secteurs d'activité :

- **La construction:** il remplace les gravillons qu'on peut trouver dans les parpaings, et possède des qualités d'acoustique et de légèreté.
- **L'abrasion:** les microbilles de verre pour traiter des surfaces sans les endommager ou la poudre de verre afin de préparer des surfaces à travailler, et les billes de verre pour le broyage
- **Les pigments pour la peinture:** dans les enduits pour un effet esthétique particulier ou dans la peinture pour la signalisation routière.
- **Les matériaux de décoration:** dans les roches décoratives pour la mosaïque par exemple.

- **Le nettoyage:** par la libération de soude et de potasse, ainsi que grâce à ses microparticules, qui possèdent des qualités de détergents.

I.3.9. DISPONIBILITE ET QUANTIFICATION DES VERRE à RECYCLER:

La génération des déchets solides urbains est déjà évaluée à environ 8.5 millions de tonnes par an, soit 23 288 tonnes par jour en 2005, et cette production connaît une progression sensible. Selon le MATE (Ministère de l'aménagement du territoire et de l'Environnement), le seuil des 12 millions de tonnes de déchets solides urbains est certainement franchi en 2010.

Les déchets solides urbains résultent de la consommation des ménages, des établissements publics (écoles, hôpitaux, etc.), locaux commerciaux et des entreprises. Les quantités de déchets produites varient d'une ville à l'autre dans les pays en voie de développement, en fonction de plusieurs facteurs, dont le plus essentiel reste la croissance démographique. À titre d'illustration, durant l'année 2007, l'établissement Net-Com a procédé à la collecte de 763 382 tonnes de déchets (ordures ménagères et assimilées) au niveau des 28 communes de la wilaya d'Alger pour lesquelles il assure (DJEMACI, 2012).

Tableau. I.2: Quantité des déchets produits par habitant (d'après rapport sur l'État de l'environnement en Algérie MATE

2005

	Taux de génération kg/hab/j			Taux de collecte
	1980*	2002**	2005*	2002*
Villes moyennes	0,5	0,6	0,8	65%
Grandes villes	0,76	0,9	1,2	92%

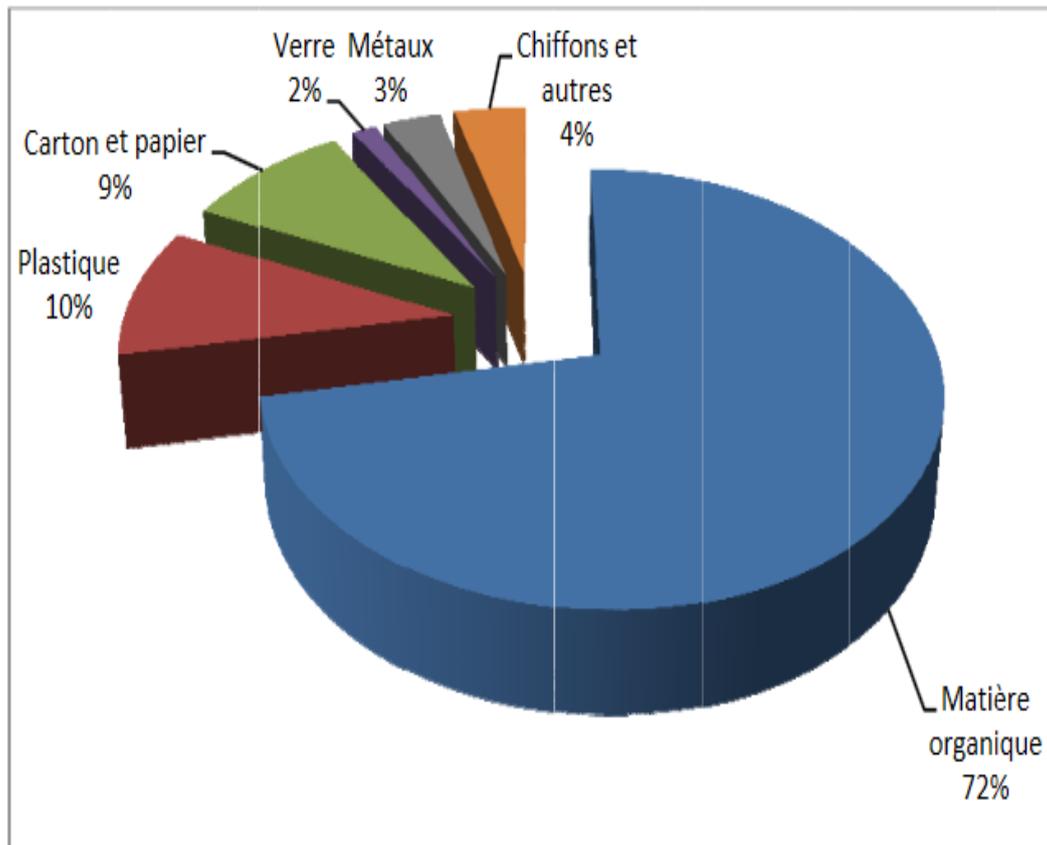


Figure. I.3: composition déchets ménagers en Algérie

Les matières organiques représentent plus de 72 % du volume des déchets en général. Alors que l'ensemble des déchets recyclables (plastique, papier verre, métaux) ne représente que 28 % du volume des déchets.

Tableau.I.3: quantités des principaux déchets recyclables

	Alger2003	Oran 2001	Médéa 98	Bechar 99
Matières Organique	75	82,4	70	56,53
Papier- carton	13	12,50	11,65	13,2
Plastiques	10	8,30	13,50	12,8
Métaux	1,30	2,60	1,35	4,86
Verres	0,80	1,30	0,50	2,66

En Algérie, la quantité de déchets ménagers et assimilés a connu une augmentation substantielle au cours des dernières décennies en raison d'une croissance démographique galopante conjuguée à une urbanisation non maîtrisée. Ce phénomène est accentué en raison d'insuffisance de moyens et d'équipements appropriés.

Parallèlement, la composition de ces déchets est en phase de passer d'un profil organique (déchets alimentaires) à des matériaux complexes (emballages, plastiques, produits en fin de vie, etc.) qui présentent des risques majeurs pour l'environnement et la santé publique. La méthode pratiquée pour leur élimination demeure à ce jour la mise en décharge, du fait de son faible coût par rapport aux autres filières comme l'incinération ou le compostage (Kehila, 2014).

Tableau. I.4: Capacité de recyclage (d'après MATE, 2004)

Nature des déchets	Quantité en tonne/ an
Papier	385.000
Plastique	130.000
Métaux	100.000
Verre	50.000
Matières diverses	95.000
Total	760.000

Source : MATE 2004

I.4.Conclusion:

Le recyclage des déchets de verre est un mode opératoire d'économie circulaire. Ce dernier harmonise les avantages économiques et le monde écologique en protégeant l'environnement, d'une part et permet de réaliser des bénéfices économiques, d'autre part.

Récemment, en Algérie, les autorités ainsi que les citoyens ont pris conscience de l'importance de recyclage du verre, ce qui incité les ingénieurs à valoriser ces déchets dans plusieurs domaines, tels que le secteur de BTP.

CHAPITRE II
COMPORTEMENT DES
ARGILES ET
TECHNIQUES DE
STABILISATION

II.1.INTRODUCTION:

La terre recense plusieurs matières variées, néanmoins, le plus grand pourcentage des minéraux qui y sont recensés reste les minéraux argileux. Les propriétés physico-chimiques, le changement de volume en fonction de la teneur en eau, les ouvrages géotechniques, ainsi que le phénomène de gonflement feront place dans la recherche menée tout en mettant en avant différentes techniques de stabilisation des argiles.

II.2.LES ARGILES:

Le mot argile vient du grec Argilos dérivé d'Argos qui veut dire blanc. Les argiles, en général, sont des produits de décomposition des roches siliceuses, par désagrégations physique et mécanique puis par altération chimique. Selon Eslinger et Peaver (AIT AGHZZAF, 2014), les argiles sont des particules de phyllo silicates dont le diamètre des grains est inférieur à deux micromètres. Ces particules appelées aussi minéraux argileux sont les responsables des propriétés physicochimiques des argiles, telles que l'aptitude au gonflement, la plasticité et les propriétés d'adsorption. La fraction fine de l'argile ($< 2\mu\text{m}$) contient souvent des minéraux non phyllo silicates (carbonates, quartz, feldspaths composés minéraux amorphes sous forme d'oxyde ou d'hydroxyde de fer et d'aluminium). Ces derniers constituent des minéraux dits accessoires ou associés aux minéraux argileux. Les minéraux argileux sont liés entre eux par des liaisons de natures très diverses, en formant des agrégats de tailles beaucoup plus grande.

Le caractère argileux des minéraux est lié à quatre critères :

- ✚ *division*: les minéraux doivent se présenter à l'état de particules de très petite taille, inférieure à $2\mu\text{m}$.
- ✚ *faciès*: leurs particules dissymétriques à tendance lamellaire peuvent glisser les unes sur les autres, ce qui leur confère la plasticité. Cette forme favorise également le piégeage de molécules, en particulier de l'eau.
- ✚ *dispersion*: leur dispersion dans l'eau constitue des suspensions colloïdales plus ou moins stables.
- ✚ *dimension*: ce sont des phyllo silicates dont au moins une dimension est d'ordre nanométrique. Les minéraux argileux sont des phyllo silicates dont l'élément de base constituant la structure est un feuillet bidimensionnel silicaté. Le feuillet phyllo

silicaté est constitué d'un empilement de couches tétraédriques (T) et octaédriques (O). Les tétraèdres, formant la couche tétraédrique, sont composés d'un atome de silicium au centre relié à quatre atomes d'oxygène aux sommets (Figure.II.1), les trois formant la base (Ob) sont partagés avec les tétraèdres contigus alors que l'oxygène au sommet dit apical (Oa) est partagé avec un octaèdre. Les octaèdres, dont l'adjonction constitue la couche octaédrique, comportent un cation au centre qui peut être l'aluminium et/ou le magnésium et/ou le fer, ... et des atomes d'oxygène ou d'hydroxyle aux sommets (Figure.II.2). En fonction du nombre des couches tétraédriques et/ou octaédriques empilées, et donc selon l'épaisseur du feuillet, on distingue différentes classes de minéraux argileux. (AIT AGHZZAF ,2014).

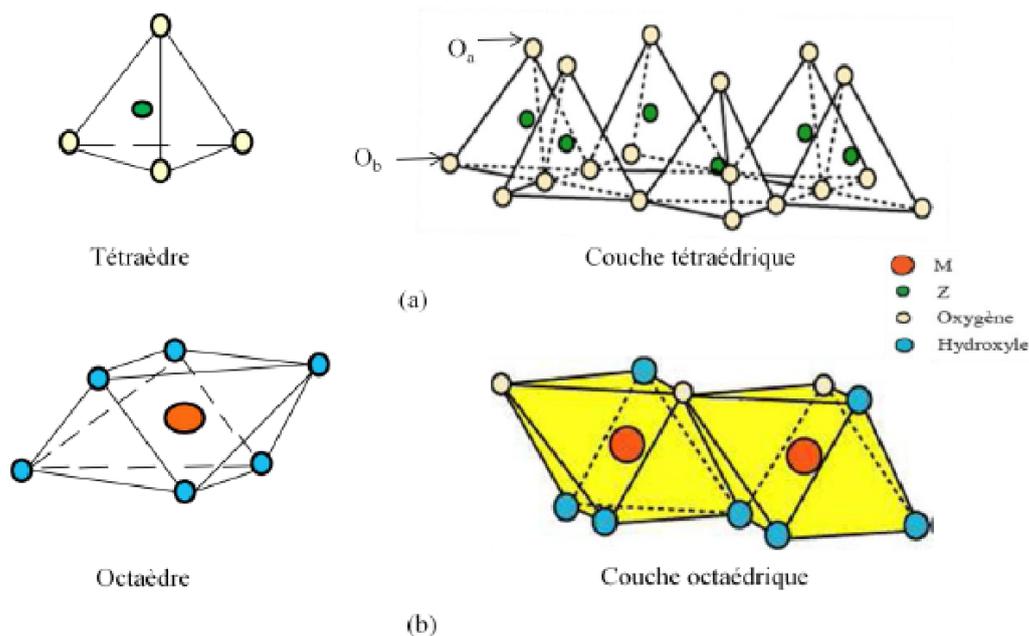


Figure II.1: Représentation a) d'un tétraèdre et d'une couche tétraédrique et b) d'un octaèdre et d'une couche octaédrique (AIT AGHZZAF ,2014)

II.3. Structure des argiles:

La structure des feuillets est déterminée par l'arrangement d'oxygènes et d'hydroxyles, de taille très supérieure à celle des cations, ces derniers pouvant se situer dans deux types de cavités, tétraédriques et octaédriques.

Le feuillet est formé par la répétition horizontale d'unités élémentaires en couches planes : couches de tétraèdres centré sur du silicium et couches d'octaèdres centré sur de l'aluminium ou de magnésium. Ceci leur confère une allure de plaquettes peu épaisses et largement développées dans deux directions de l'espace. Leurs structures sont organisées en plans ioniques successifs. La charpente anionique du feuillet est constituée trois types de plans (figure II.2) anioniques superposés et parallèles formés d'anions O^{2-} ou OH^- [14-15]. Les cations (Al^{3+} , Si^{4+} , Fe^{3+} , ...) sont dispersés dans cette charpente. Les rayons ioniques de ces cations sont, en général, inférieurs à ceux des anions auxquels ils sont associés.

Les atomes de silicium partageant leurs quatre charges positives avec quatre atomes d'oxygène et les atomes d'aluminium (ou de magnésium) liés à six oxygènes et groupements OH , ou oxhydroyles. La formule structurale s'établit en plaçant Al^{3+} , Si^{4+} , Fe^{3+} dans la couche tétraédrique à concurrence de 4 atomes par unité $O_4(OH)_2$ puis en plaçant les cations Al^{3+} , Fe^{3+} , Cr^{3+} , Mg^{2+} , Fe^{2+} , Mn^{2+} , Ni^{2+} , Li^+ , Ti^{4+} , ... dans les sites octaédrique du feuillet. Les sites inter-foliaires sont habituellement occupés par les cations Na^+ , K^+ et Ca^{2+} d'où le caractère sodique, potassique ou calcique de l'argile.

La présence des charges électriques sur la surface des feuillets et surtout l'échangeabilité des cations inter-foliaires sont les principaux éléments responsables

De l'hydratation, du gonflement, de la plasticité et propriétés hydrophiles des argiles (BOUCHETA, 2017).

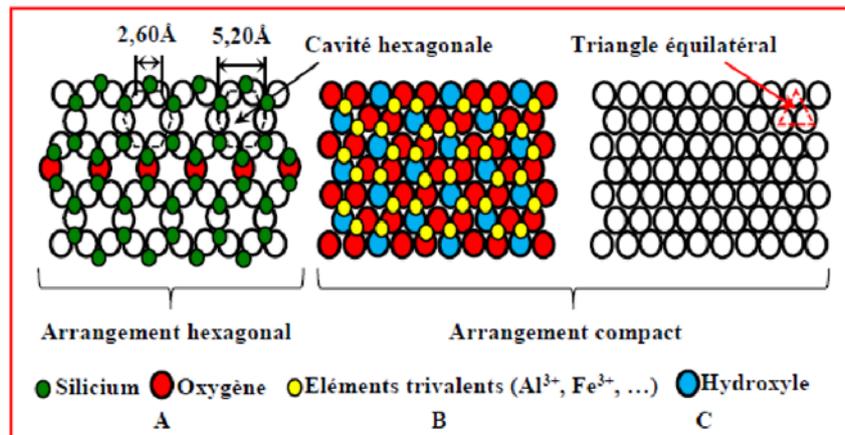


Figure II.2: Plans anioniques (O²⁻, OH⁻) de la charpente d'un feuillet selon les références La coordinaence de ces groupes est de 4 dans le plan A et de 6 dans les plans B et C

II.4.Texture d'une argile:

Tout comme la structure cristalline des argiles, la texture est un paramètre important car il conditionne les propriétés physiques du minéral (Caillère& Hénin, 1959). La texture concerne l'assemblage des minéraux (argileux ou pas) sous forme d'agrégats ainsi que l'arrangement ou distribution spatiale de ces agrégats (Audiguier, 1979). Aubouin et al. (1968) définissent la texture comme « la forme, la dimension et la disposition d'un certain nombre de minéraux naturellement groupés en une population au sein de la roche ».

Cette organisation peut faire l'objet de différentes classifications (Van Olphen, 1963 ; Collins & McGown, 1974 ; Le Roux, 1975 ; Sergeyev et al. 1978).

Ces classifications sont valables pour les sols argileux. Gens et Alonso (1992) ont établi une classification pour les sols gonflants, à partir des travaux de Collins et McGown (1974). Cette classification se base sur l'organisation des particules élémentaires argileuses :

- Texture « matricielle » (Figure II.3.a): texture dont la base est une pâte homogène avec les particules élémentaires disséminées dans cette pâte. Cette texture est caractéristique des sols naturels ou des sols compactés du côté humide de l'optimum Proctor (Figure. II.4.b).
- Texture « agrégée » ou « compactée » (Figure II.3.b) : texture compactée avec les particules élémentaires assemblées sous forme de mottes ou d'agrégats. Cette texture

est caractéristique des sols compactés, du côté sec de l'optimum Proctor (Figure II.4.b) (Tatiana MAISON, 2011).

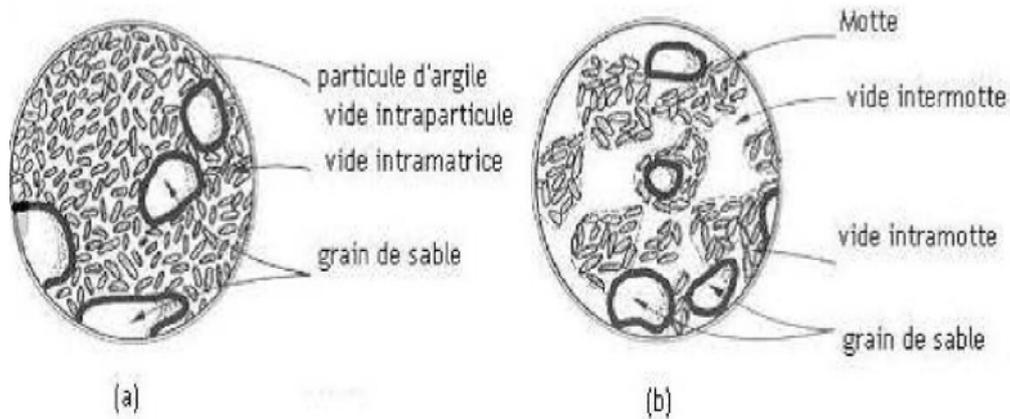


Figure II.3: Texture des sols gonflants (d'après Tatiana MAISON, 2011)

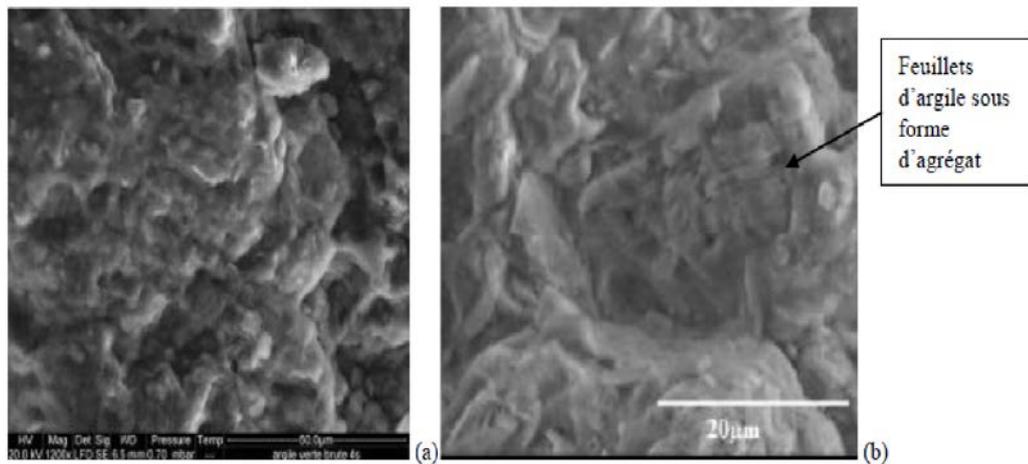


Figure II.4: Photographies MEB de texture matricielle (a; Argile Verte de Romainville) et texture agrégée (b ; Argile de Bavent) (Vincent et al. 2009)

II.5. Les différentes catégories d'argiles:

Les argiles sont classées sur la base de l'épaisseur et de la structure du feuillet.

Il existe quatre groupes les plus classiques :

- Le feuillet composé d'une couche octaédrique et d'une couche tétraédrique fait partie des minéraux à 7 Å d'épaisseur. Il est identifié par T : O ou 1 : 1

Chapitre II: comportement des argiles et techniques de stabilisation

- Le feuillet composé d'une couche octaédrique et de deux couches tétraédriques fait partie des minéraux à 10 Å d'épaisseur. Il est identifié par T : O : T ou 2 : 1 ;
- Le feuillet composé des feuillets T : O : T et des couches octaédriques inter foliaires par alternance fait partie des minéraux à 14 Å d'épaisseur.
- Les minéraux argileux inters stratifiés forment des feuillets d'épaisseurs variables. Ces minéraux proviennent du mélange régulier des différents groupes présentés dans le tableau II.4 La classification des phyllo silicates est réalisée grâce à la valeur de la charge permanente du feuillet (ABAKAR, 2018).

Tableau II.1: Classification des phyllo silicates, d'après (ABAKAR ,2018)

Nature du feuillet	Nature des cations interfoliaires	Groupe	Nature de la couche octaédrique	Exemples
1 : 1	Pas de cation ou seulement de l'eau	Kaolinite	Diocataédrique	Kaolinite, halloysite, nacrite, dickite
2 : 1	Pas de cation	Pyrophyllites	Diocataédrique	Talc
	Cations hydratés et échangeables	Smectites	Diocataédrique	Montmorillonite, nontronite, beidellite, saponite
		Vermiculites	Diocataédrique	Vermiculite diocataédrique à triocataédrique
	Cations monovalents non hydratés	Micas	Diocataédrique	Muscovite, illite, Paragonite, biotite
	Cations divalents non-hydratés	Micas durs	Diocataédrique	Margarite, clintonite
	Hydroxyles	Chlorites	Diocataédrique	Donbassite, sudoite, Clinochore
2 : 1 fibré	/	Palygorskites, Sépiolites	Diocataédrique	Sépiolite, Palygorskite

II.6. Les différents types d'argiles:

Il existe plusieurs variétés des familles d'argiles qui composent des dizaines d'espèces, (voir le tableau.II.1). Par ailleurs, les trois familles qui sont la Kaolinite, l'illite et la montmorillonite sont présentes un peu partout dans la terre en différentes proportions (ABAKAR, 2018).

II.6.1. La kaolinite:

Les minéraux argileux (1 : 1 ou T-O) de 7,2 Å d'épaisseur sont les kaolinites (figure. II.6.1.1 et figure. II.6.1.2). Dans le cas où deux feuillets sont superposés, les H⁺ se trouvant sur la surface inférieure et les O⁻ de la surface supérieure créent entre eux une liaison hydrogène (O-H) forte. Une grande stabilité est assurée entre la liaison hydrogène et la liaison de Van der Waals pour faire face à l'action de l'eau. De ce fait, les minéraux argileux kaolinites sont stables et leurs structures élémentaires sont protégées vis-à-vis de l'eau.

La faible valeur de la surface spécifique (45m².g⁻¹) et le nombre élevé de feuillets par particule de kaolinite expliquent la forte liaison hydrogène entre les feuillets.

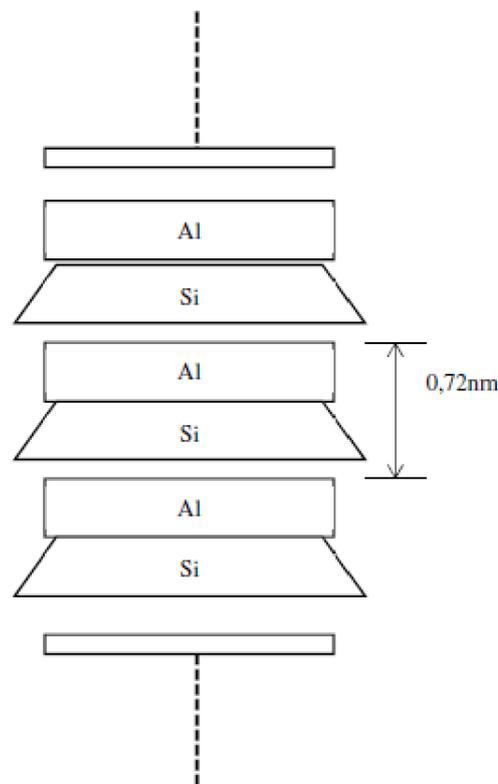


Figure II.5: Structure schématique de la kaolinite

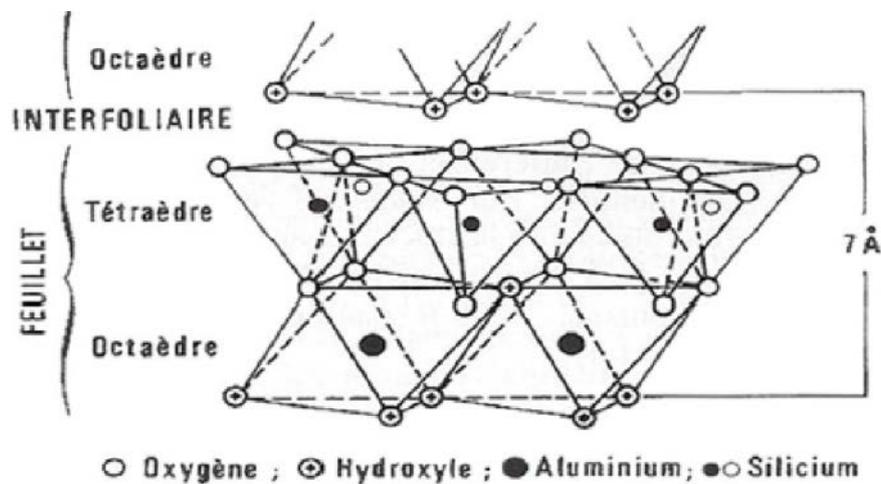


Figure II.6: Vue isométrique de la structure atomique de la kaolinite

II.6.2. La montmorillonite:

La montmorillonite est constituée des feuillets élémentaires de type 2 pour 1 ou T : O : T. Elle est caractérisée par deux couches tétraédriques de silice entourée d'une couche octaédrique d'alumine. L'empilement des feuillets n'est pas ordonné.

« Chaque feuillet est tourné dans son plan par rapport au précédent et a une extension latérale extrêmement importante par rapport à son épaisseur qui est estimée à 9,6 Å » (figure II.7) et figure II.8). Par ailleurs, la montmorillonite possède une grande sensibilité à l'eau et un gonflement conséquent dans la mesure où des molécules d'eau s'infiltrent entre les feuillets. Les feuillets ont des épaisseurs qui varient de 9,6 Å à 15 Å. En fonction de la nature de cation compensateur et la présence d'humidité entre les feuillets, leurs épaisseurs augmentent encore plus.

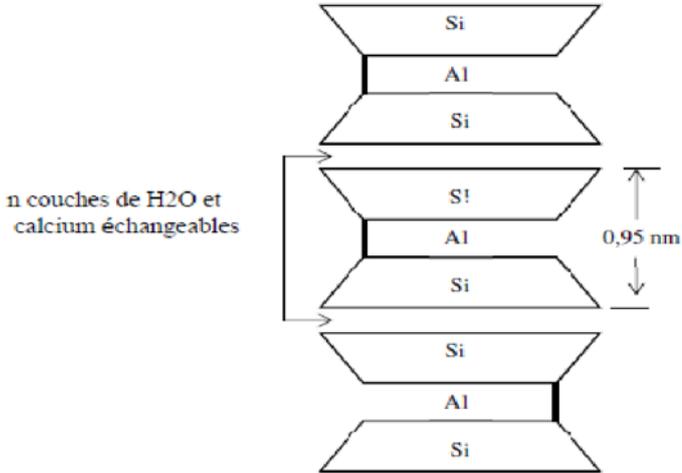


Figure II .7: Schéma de la structure de la montmorillonite

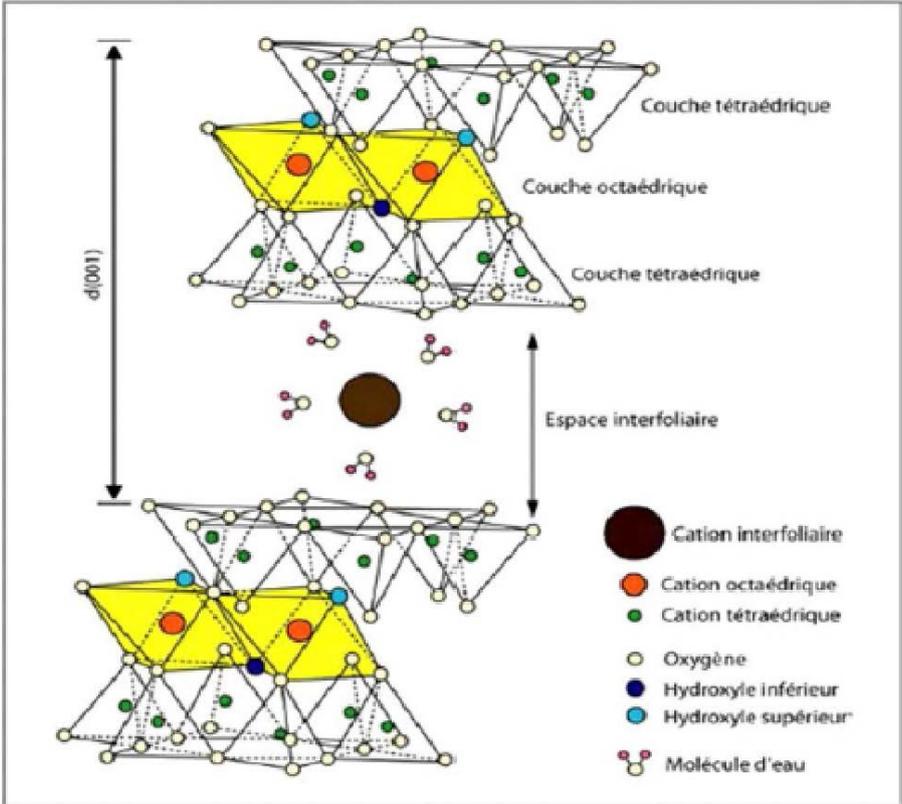


Figure II.8: Schéma de la structure 3 D de la montmorillonite

II.6.3.L'illite:

La structure de l'illite de type 2 pour 1 est proche de celle de montmorillonite. La différence est que cette dernière présente un déficit de charge dû au remplacement des ions par des cations de potassium K^+ (figure II.9). L'avantage des cations potassium (K^+) est qu'il arrive à remplir la cavité dans lequel il est logé. Les ions potassium anhydre arrivent à assurer une liaison forte entre les feuillets, ce qui empêche la pénétration des molécules d'eau entre ces feuillets et en même temps maintenir l'espace interfolier fixe à $9,6 \text{ \AA}$. Par conséquent, l'illite possède une stabilité face à l'eau par rapport à la montmorillonite.

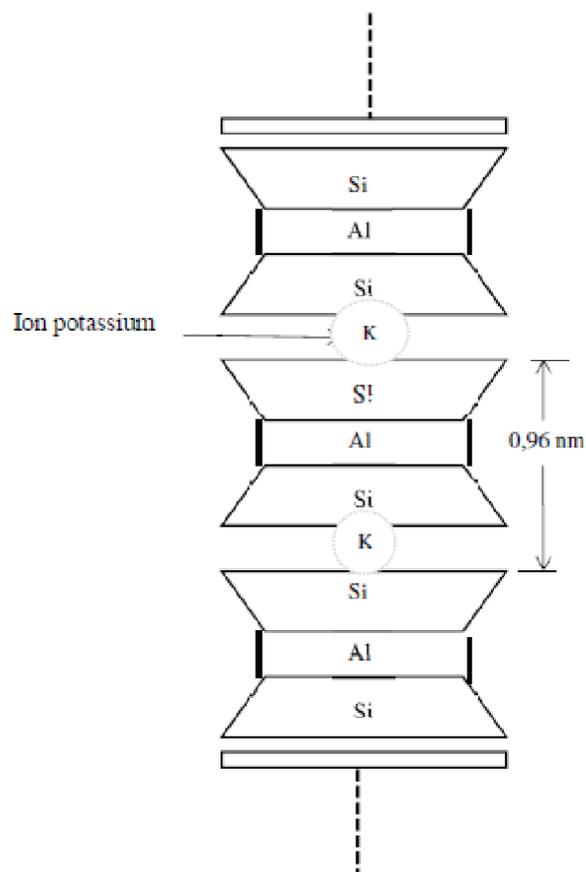


Figure II.9: Schéma de la structure de l'illite

II.7. Formation:

Les argiles naissent du sol en constant mouvement. Elles apparaissent selon trois grands processus de formation, juxtaposables (figure. II.10). Le premier est relatif à la simple décomposition des roches par érosion. Les phénomènes caractérisant une érosion des sols sont nombreux. La pluie, le vent, le gel, le dégel, les vagues et bien d'autres sont autant de phénomènes naturels à l'origine de la formation des argiles. Le deuxième processus est appelé néoformation. Ceci correspond à la formation du minéral. Par combinaison, des substances transportées par l'eau du sol vont, par combinaison, s'arranger pour former une structure minérale. Le troisième mécanisme correspond au processus de transformation des minéraux évoluant par dégradation (perte d'équilibre du sol) ou aggradation (accumulation de sédiments dans un cours d'eau par excès de transport par l'eau) d'ions minéraux argileux.

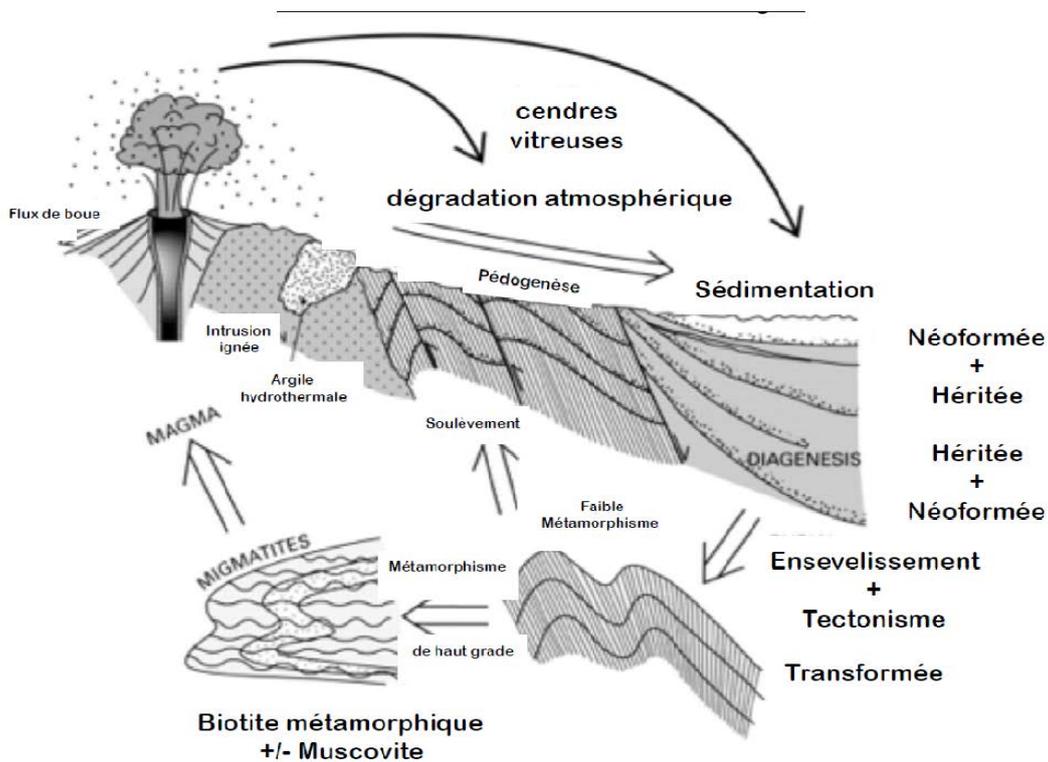


Figure II.10: Schéma du Processus de formation de l'argile.

Les roches argileuses sont présentes presque partout à la surface de la planète, mais leurs propriétés et leur composition diffèrent selon les conditions dans lesquelles elles se sont

formées. L'altération de diverses roches, de par les temps géologiques, sont à l'origine des différentes argiles. C'est un ensemble qui caractérise l'argile, le type de roche dont elle est issue, le climat, la topographie du sol,... Un climat froid provoquera une altération faible de la roche. Les minéraux argileux auront donc une composition similaire à celle des minéraux provenant de la roche d'origine. C'est le cas des illites et des chlorites. Un climat à la fois chaud et humide va entraîner une forte hydrolyse voyant l'obtention des kaolinites et des smectites. Un climat tempéré verra un processus d'altération dit modérés 'opérer sur la roche. Il en résultera la création d'argiles de types illites, chlorites ou encore vermiculites. La topographie des sols peut également jouer un rôle dans la composition de l'argile. Une zone pentue prévoit un fort drainage de l'eau, entraînant la formation de kaolinite. Inversement, un milieu confiné, comme retrouvé dans les cuvettes, produira des smectites par phénomène de concentration. Ces différents processus de formation des argiles sont dits d'altération. Les argiles provenant de la dégradation des roches sont des argiles résiduelles. Les roches vont s'accumuler par érosion éolienne ou hydrique entraînant la formation des argiles.

Les argiles fibreuses quant à elles proviennent de croutes de calcaires. Ces zones présentant un climat sec, sont riches en sels. Elles peuvent se former en solution, par une richesse ionique.

Une argile néoformée peut évoluer avec son milieu. La transformation va se réaliser par soustraction ou fixation d'ions. Une kaolinite peut donc devenir un chlorite et des smectites, des illites (HERNOT, 2016).

II.8. Activité des argiles:

Kempton (1953), a considéré que les valeurs des limites d'Atterberg sont liées à la quantité d'eau retenue à la surface des particules et donc à la quantité d'argile présente dans le sol. Cet auteur a défini l'activité d'une argile par le rapport de l'indice de plasticité (I_p) et du pourcentage des éléments inférieurs à deux microns ($C_2 < 2 \mu m$). (OUSLATI, 2019)

$$A_1 = I_p / C_2 \dots\dots\dots \text{Eq (II. 1)}$$

Kempton a proposé la nomenclature suivante :

- *Argile inactives*: les argiles qui ont une activité inférieure à 0,75. Ces argiles sont à base de Kaolinite, ou des argiles contenant peu de minéraux argileux.

- *Argile normale*: qui a une activité comprise entre 0,75 et 1,25.
- *Argile active*: qui ont une activité comprise entre 1,25 et 2.
- *Argile très actives*: qui a une activité supérieure à 2.

En ce qui concerne les argiles compactées, Seed et al (1962), ont introduit une modification à la définition de Kempton sous la forme suivante :

$$A_2 = I_p / (C_2 - n) \dots \dots \dots \text{Eq (II. 2)}$$

Sachant que :

- $n = 5$ cas des sols naturels.
- $n = 10$ cas des sols reconstitués

II.9. Propriétés des minéraux argileux:

Les minéraux argileux se caractérisent par plusieurs propriétés physico-chimiques dont les principales sont:

- La surface spécifique
- La capacité d'adsorption d'eau et de gonflement
- La capacité d'échange cationique. (Bentahar, 2016)

II.9.1. La surface spécifique:

Malgré leur taille fine, les argiles possèdent une grande surface spécifique qui dépend de la nature du minéral argileux. La surface totale des argiles comprend une surface externe facilement accessible et une surface interne qui correspond à celle développée par l'espace inter foliaire durant son expansion. Les minéraux de la famille des smectites se caractérisent par une surface spécifique très importante par rapport à celle des autres types d'argiles due à leurs propriétés de gonflements. Elle peut atteindre les 800 m²/g si les particules sont complètement hydratés. Parmi les méthodes les plus utilisées pour déterminer la surface spécifique, on cite la méthode d'adsorption d'azote. Cette approche consiste à faire adsorber sur une surface argileuse préalablement activée par un traitement thermique, des molécules dont on connaît leur dimension et leurs possibilités d'arrangement. L'azote N₂ est le gaz le plus utilisé dans cette méthode car aucune interaction spécifique n'intervient durant son mécanisme d'adsorption. Mais ce gaz inerte présente une faible affinité pour les liaisons au niveau de l'espace inter foliaire et par conséquent, il nous permet de mesurer juste la surface

externe. Le tableau (II.2) résume les valeurs standards caractéristiques des surfaces de quelques familles argileuses.

Tableau. II.2: Valeurs de la surface spécifique de quelques familles argileuses

Argiles	Surface interne (m ² /g)	Surface externe (m ² /g)	Surface total (m ² /g)
Kaolinite	0	15	15
Illite	5	25	30
Smectite	750	50	800
Vermiculite	750	1	751
Chlorite	0	15	15

II.9.2. La capacité de gonflement et d'adsorption d'eau:

Généralement, toutes les argiles possèdent une capacité de rétention des molécules d'eau plus au moins importantes. Mais seulement quelques-uns sont capables d'incorporer des quantités appréciables de molécules d'eau dans leur espace inter foliaire. Les smectites, les vermiculites et les minéraux interstatifiés sont parmi les argiles qui se caractérisent par une forte capacité d'adsorption d'eau entre les feuillets de leur structure ce qui provoque une variation de leurs volumes et provoque ainsi leur gonflement. Il est à préciser que le gonflement des argiles est tributaire aussi de sa composition puisque ces matériaux sont constitués par des minéraux argileux et d'autres minéraux associés. La texture des argiles joue aussi un rôle primordial dans ce processus d'expansion. Pour les argiles naturelles, cette propriété est liée aussi au site d'échantillonnage ce qui génère une spécificité pour chaque type d'argile selon sa genèse et son milieu de formation.

Les minéraux gonflants ont une structure de base à 10 Å. Cette distance est variable selon l'état d'hydratation. Ainsi, elle est d'environ 12,5 Å pour l'incorporation d'une couche d'eau au tour du cation interfoliaire et de 15 Å pour deux couches. Cette hydratation conduit à une

augmentation du volume pouvant atteindre les 95 %. Par ailleurs, il ya des minéraux argileux contenant de l'eau adsorbée mais qui n'ont pas pour autant de propriétés de gonflement, il s'agit des argiles fibreuses.

II.9.3.Capacité d'échange cationique:

Afin d'établir l'électro neutralité au niveau de l'interface solide-liquide, les charges de surface seront compensées par des ions de charge opposées provenant de la solution, généralement des cations pour les argiles. La capacité d'échange cationique CEC est définie comme la concentration totale des sites superficiels disponibles aux cations. Ce paramètre est exprimé en quantité de charge par unité de masse (meq/100g). Le principe général d'évaluation de la CEC consiste à mesurer la quantité totale fixée d'un cation indicateur introduit en excès dans une suspension argileuse. Cette mesure est souvent réalisée à pH fixe puisque la CEC est tributaire aussi du pH suite à la présence des groupements silanols et aluminons sur les surfaces latérales susceptibles de se protoner ou de se déprotoner (Bentahar, 2016)

II.10.Caractérisation simplifiée de l'aléa:

II.10.1.Approche générale des mouvements de terrain:

Un bâtiment repose sur le sol au moyen d'un système de fondations. Ce système a pour but de soutenir le bâtiment, c'est-à-dire :

- éviter que le bâtiment ne s'enfonce sous l'action des charges gravitaires
- empêcher les mouvements du bâtiment par rapport au sol sous l'action d'autres forces (soulèvement ou glissement à cause du vent par exemple)

Un bâtiment est généralement conçu pour être fondé sur un sol supposé immobile. Le système de fondation rend le bâtiment solidaire du sol. Lorsque le sol est susceptible de bouger, des dispositions particulières doivent être adoptées. Il y a lieu de tenir compte :

- des forces d'inerties engendrées par le mouvement transmis à la structure en cas d'accélération non négligeables (séismes par exemples).

-d'une capacité portante du sol, éventuellement variable dans le temps et l'espace (décompression).

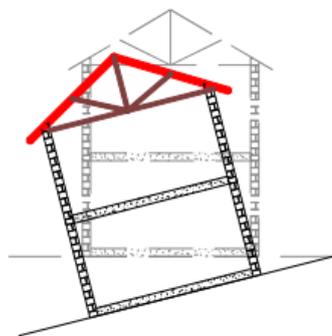
-de déplacements relatifs entre différents points du système de fondation : si le système n'est pas solidarisé au moyen d'une structure adaptée (réseau de longrines par exemple) des éléments de fondations individuels peuvent se déplacer les uns par rapport aux autres. Il en résulte des efforts potentiellement importants dans la structure.

Dans le cas des mouvements de terrain, les forces d'inerties sont négligeables car le mouvement du sol est très lent (accélération faible du sol). En revanche, les déplacements différentiels peuvent être importants à l'échelle de l'emprise au sol de la construction. Le problème majeur vient donc du déplacement relatif des points d'appuis du bâtiment que la structure n'est pas toujours capable d'accepter sans dommage. On observe les phénomènes suivants illustrés sur la (Figure II.11)

- décrolement de certaines zones d'appuis : perte de portance provoquant des efforts de flexion et de cisaillement importants dans la structure

- mouvement d'ensemble (corps rigide) du bâtiment

Mouvement de corps rigide



Déplacement d'appuis

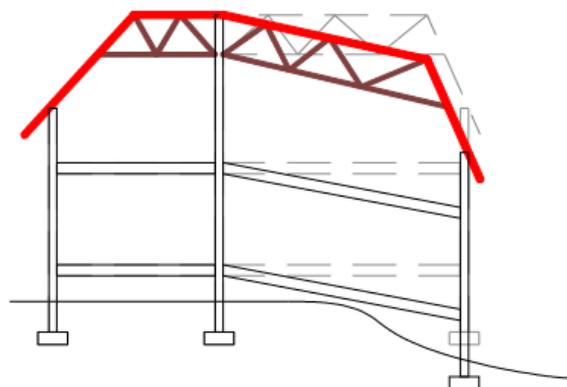


Figure II.11: Mouvements de terrain principaux

II.10.2. Caractéristiques propres au phénomène de retrait gonflement des argiles:

Le phénomène de retrait-gonflement des argiles est dû à la sensibilité des sols argileux aux variations d'humidité. En fonction de leur teneur en eau, ces sols voient leur volume et leur comportement mécanique varier sensiblement.

La teneur en eau des sols est influencée par de nombreux paramètres qui comprennent entre autres :

- Les conditions hydrologiques : présence de nappe phréatique, drainage, pentes
- Les conditions météorologiques : apport d'eau en temps de pluie, évaporation en surface en périodes de fortes chaleurs.

• L'environnement en surface : les végétaux accélèrent l'évaporation, les obstacles bâtis empêchent l'eau de pénétrer localement.

- Les phénomènes de diffusion dans le sol : écoulement, variations de pression.

Du fait de l'hétérogénéité du sol et de l'environnement en surface, les couches de sols argileuses situées sous les fondations d'une maison peuvent subir des variations de teneur en eau très hétérogènes d'un point à un autre et, par conséquent, présenter des variations de volumes non uniformes. Il en résulte potentiellement des déplacements différentiels entre les points d'appuis d'une construction. Par exemple, la présence d'un arbre à proximité d'une construction peut avoir les conséquences suivantes :

- Sous l'espace construit, les variations de teneur en eau sont lentes (diffusion, écoulement) car la construction empêche la pénétration de l'eau de pluie et limite l'évaporation.
- A proximité de l'arbre en revanche, les variations sont rapides car l'évaporation est combinée au prélèvement d'eau par les racines de l'arbre.

En période de forte chaleur ou de sécheresse, le sol situé à proximité de l'arbre est beaucoup plus sec que sous la maison. Si l'arbre est près de la maison, la zone de sol se subissant un retrait (diminution de volume) peut impacter certaines parties des fondations de la maison. En conséquence, sous les fondations situées à proximité de l'arbre on constatera soit un mouvement des fondations soit un décollement du sol. Il en résulte des contraintes fortes dans les éléments de structure et des dommages potentiels (déformations, fissures) (Armines, 2009).

II.11.STABILISATION CHIMIQUE DES ARGILES:

La stabilisation chimique permet, grâce à la réaction du produit avec les composantes du matériau, une augmentation de la cohésion du matériau. Elle consiste à incorporer au sol les liants hydrauliques routiers ou liants hydrocarbonés. Il s'agit dans tous les cas d'augmenter la cohésion des matériaux en utilisant une réaction chimique provoquée par l'eau et les matériaux eux-mêmes.

II.11.1.Traitement aux liants hydrauliques:

Les liants hydrauliques sont des poudres fines constituées de sels minéraux anhydres réactifs en présence d'eau. Ils s'hydratent en présence d'eau pour former un matériau solide, véritable roche artificielle. Le traitement des sols aux liants hydrauliques est une technique qui consiste à incorporer, au sein du sol, cet élément d'apport avec éventuellement de l'eau et de les mélanger plus ou moins intimement, jusqu'à l'obtention d'un matériau homogène pour lui conférer les propriétés nouvelles.

II.11.2.Traitement au ciment:

Le ciment est utilisé dans le but d'obtenir un développement rapide et durable des résistances mécaniques et des stabilités à l'eau et au gel. Les réactions du ciment avec un sol consistent essentiellement en une hydratation des silicates et aluminates de calcium anhydres, avec passage par la phase soluté suivie de la cristallisation des produits hydratés : c'est la prise hydraulique. Les avantages du traitement au ciment sont :

- Augmentation de la résistance du sol et de la durabilité ;
- Réduction de la compressibilité et du gonflement ;
- Formation d'une couche dure, cohérente et imperméable.

La stabilisation des sols au ciment trouve son application tant pour les couches de surfaces que pour la zone supérieure de la couche de fondation ou de la sous couche de fondation ou de la sous couche de routes et chemins de toute nature.

II.11.3.Traitement à la chaux:

La chaux est obtenue par cuisson de carbonate de calcium pur (CaCO_3). Elle se présente sous deux formes :

- Sous forme de chaux vive (CaO) : $CaCO_3 \rightarrow CaO + CO_2 \uparrow$ ($T > 900^\circ C$)
- Sous forme hydratée (Ca(OH)₂) : $CaO + H_2O \rightarrow Ca(OH)_2 + \text{Chaleur}$.

Compte tenu de ses propriétés, la chaux modifie de façon sensible le comportement des sols fins argileux ou limoneux, grâce à trois actions distinctes :

- Une diminution de la teneur en eau : la teneur en eau d'un mélange sol-chaux se trouve abaissée en raison de :
- L'apport de matériaux secs ;
- La consommation de l'eau nécessaire à l'hydratation de la chaux (chaux vive) ;
- L'évaporation d'eau suite à la chaleur dégagée par la réaction d'hydratation et par l'aération provoquée par le malaxage.
- Des modifications immédiates des propriétés géotechniques du sol : l'incorporation de la chaux dans un sol argileux, développe une agglomération des fines particules argileuses en éléments plus grossiers et friables : c'est la floculation.

Les indices de ces réactions sur le mélange sol-chaux sont :

- Une diminution de l'indice de plasticité I_p ;
- Une augmentation de l'indice portant immédiat I_{PI} ;
- Un aplatissement de la courbe Proctor avec diminution de la densité de l'optimum Proctor, et augmentation de la teneur en eau (matériaux limoneux, argileux et matériaux évolutifs comme les marnes, schistes, craies, ... $I_p > 20$).

En techniques routières, la chaux est utilisée comme stabilisant ou pour rendre compactable les sols fins trop humides. Les avantages du traitement à la chaux sont multiples : valorisation des matériaux médiocres, meilleure gestion des ressources naturelles, réduction du trafic poids lourds, réduction des immobilisations pour intempéries, diminution de la durée des travaux, et surtout réduction du coût des travaux (Honoré, 2015).

II.11.4. Autre techniques de stabilisation:

II.11.4.1. Drainage:

C'est la technique la plus classique qui est mise en œuvre. Plusieurs procédés sont utilisés ; comme les tranchées drainant, drains de carton, drains de sables verticaux, tapis de la cote de la nappe (Livet).

II.11.4.2.Substitution:

C'est la suppression de la couche du sol gonflant. C'est la solution la plus évidente. Si la couche a une grande épaisseur, la suppression totale ne peut être envisagée. Elle consiste à excaver jusqu'à une certaine profondeur puis remblayer avec du sable ou autres matériaux graveleux. C'est une solution très coûteuse.

II.11.4.3.Application de fortes pressions:

Le gonflement peut être évité en appliquant au sol des pressions supérieures à la pression de gonflement. Il s'agit de pression de gonflement réelle, c'est-à-dire correspondant à la pression limite minimum nécessaire pour empêcher le sol de gonfler par des chemins de contraintes réelles, in situ, cette pression peut être appliquée soit par l'édifice lui-même, soit par des surcharges qui sont généralement des remblais de sols non gonflants (Mouroux.1969). C'est une solution à déconseiller.

II.11.4.4.Compactage:

Dawson recommande de compacter les argiles à des densités minimales et Seed (1961) note que les argiles compactées de la côte sèche de l'optimum ont plus tendance à gonfler que si elles sont compactées de la côte humide. Malheureusement, de la côte humide, les argiles sont moins résistantes. Il faudrait donc retrouver un compromis.

II.11.4.5.Prehumidification:

On crée ainsi un gonflement avant construction et si une forte teneur en eau est maintenue. Le volume restera sensiblement constant par la suite. Deux techniques sont utilisées :

- Simple arrosage par jet.
- Création de bassins au-dessus du sol gonflant, et c'est beaucoup plus utilisé.

II.11.4.6.Traitement thermique:

Une augmentation de la température peut améliorer la résistance d'une argile. En réduisant la répulsion électrique entre les particules sous l'effet de la chaleur on provoque un écoulement de l'eau interstitielle due au gradient thermique appliqué.

II.11.4.7.Utilisation de fondations et d'édifices spéciaux :

Elles sont utilisées, soit pour réduire le gonflement, soit pour dissiper les pressions du gonflement. L'étude la plus intéressante était faite par Jennings et Evans (cité par Mouroux ; 1969). Elle donne, en effet, plusieurs types de construction suivant le soulèvement estimé. Elle comprend :

- Des renforcements en acier des murs pour assurer une plus grande rigidité.

Chapitre II: comportement des argiles et techniques de stabilisation

- Des « constructions Split », c'est-à-dire, conçues pour assurer le déplacement éventuel sans dommage d'une partie de l'édifice.
- Des reports de charges sur des semelles isolées.
- Des pieux fondés sur une couche peu gonflante.

Par ailleurs, on peut placer un tapis graveleux entre l'argile et la construction pour amortir l'effet du gonflement.

La stabilisation des sols argileux a été étudiée par un grand nombre de chercheurs. Beaucoup de méthodes et d'appareillages ont été mis au point, pour connaître l'influence de l'efficacité d'une solution ou d'un produit sur la stabilisation d'un sol argileux. Quelques exemples sont cités concernant l'utilisation de produits chimiques servant à la stabilisation des sols argileux. **(DJOUDI ,2015)**

II.12.Conclusion:

Ce chapitre a été consacré à l'étude bibliographique présentant la structure des argiles ainsi que l'état d'avancement de la recherche dans le domaine de la stabilisation des sols argileux.

Le choix des techniques de stabilisation les plus utilisées dépend de plusieurs paramètres tels que ; les considérations économiques, la nature du sol à traiter, la durée de l'opération, la disponibilité des matériaux à utiliser ainsi que les conditions d'environnement.

Chapitre III
Les essais mécaniques

III.1.Introduction:

La géotechnique est le domaine d'étude des propriétés physiques, mécaniques et hydrauliques des sols et des roches et de leurs applications en construction civile. Les applications consistent en la conception et le dimensionnement de solutions techniques adaptées à la situation donnée, visant le plus souvent à assurer la stabilité de l'ouvrage projeté.

La mécanique des sols moderne est née pendant les années 1910 à 1930, en grande partie à la suite des travaux de Terzaghi (Bjerrum, Casa grande, Peck et Kempton, 1960) et de Fellenius ainsi que des collègues de celui-ci en Suède (Bjerrum et Flodin, 1960). Le terme de mécanique des sols a été utilisé d'une façon générale après une série d'articles publiés par Terzaghi dans l'Engineering News Record (Terzaghi, 1925).

Pour étudier le comportement mécanique d'un matériau granulaire, plusieurs types d'essais peuvent être réalisés dans les laboratoires. Nous pouvons citer entre autres: l'essai triaxial, l'essai Œdométriques l'essai de cisaillement direct...

III.2.L'essai Œdométrique:

L'essai de chargement unidimensionnel tire son origine de la nécessité d'évaluer les tassements d'un sol sous le poids d'ouvrages. Cet essai, appelé « essai Œdométriques », soumet à des charges verticales un échantillon de sol drainé suivant cette direction et maintenu latéralement par une paroi rigide appelée bague ou anneau Œdométriques.

Le chargement Œdométriques se fait sur un appareil standard à balancier, selon une progression géométrique. Chaque palier de chargement est maintenu jusqu'à stabilisation ou jusqu'à un temps arbitrairement défini. Cette relation entre le tassement et le temps est utilisée pour caractériser la consolidation des sols. La courbe reliant les charges aux tassements obtenus est la courbe de compressibilité Œdométriques. L'objectif est alors de déterminer le point d'inflexion de cette courbe, qui sépare la partie initiale ou élastique de la partie finale ou plastique. Ce point d'inflexion donne la valeur de la pression de pré consolidation du sol.

III.2.1.Principe et courbes de consolidation et de compressibilité:(Luc Sibille., 2017)

L'essai consiste à mesurer la variation de hauteur en fonction du temps de l'échantillon de sol soumis à une contrainte σ . Normalement ces mesures s'effectuent pendant 24 h pour un σ donné.

Au bout de 24 h, on considère que la consolidation primaire est terminée. On procède alors à un 2^{ème} chargement sur le même échantillon avec une contrainte σ en générale deux fois supérieure à la contrainte précédente, et ainsi de suite.

L'essai œdométriques permet de tracer deux types de courbes:

- pour une contrainte de chargement donnée σ , la mesure du tassement Δh en fonction du temps t permet de tracer la **courbe de consolidation (Figure.III.1)** sous la forme $\Delta h = f(\text{Log}t)$ ou $\Delta h = f(\sqrt{t})$. A' partir de ces courbes on peut calculer le **coefficient de consolidation** C_v (m²/s) grâce auquel on peut calculer le temps de tassement d'une couche de sol en place sous une charge quelconque en utilisant la relation:

$$t = \frac{T_v \times h^2 D}{C_v}$$

Où: t : est le temps de tassement (s),

hD : la hauteur de drainage de la couche de sol (m),

T_v : le facteur temps (un paramètre sans dimension).

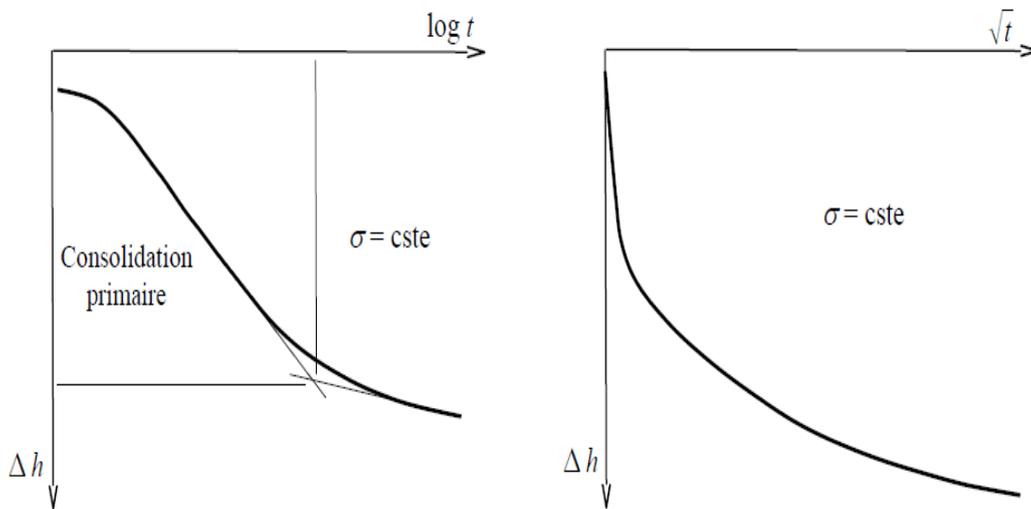


Figure.III.1: courbes de consolidation.

- **une courbe de compressibilité (figure.III.2)** sous la forme $e = f(\log \sigma')$ où e est l'indice des vides correspondant aux tassements finaux mesurés à la fin de chaque palier de chargement sous une contrainte σ (notons qu'en condition œdométrique l'évolution de l'indice

des vides e est équivalente à l'évolution de la hauteur h de l'échantillon de sol puisqu'il existe une relation directe entre les deux: $\Delta h/h_0 = \Delta e / (1 + e_0)$

A partir de cette courbe on peut déterminer:

- La **contrainte pré consolidation** σ'_p qui correspond à la plus forte contrainte à laquelle a été soumis le sol dans sa vie,
- l'**indice de compression** C_c (sans dimension) utilisé pour calculer le tassement de la couche de sol lorsque celui-ci est soumis à une contrainte supérieure à σ'_p ,
- l'**indice de gonflement** C_s (sans dimension) utilisé pour calculer le tassement de la couche de sol lorsque celui-ci est soumis à une contrainte inférieure à σ'_p ou sur des cycles de déchargement-rechargement.

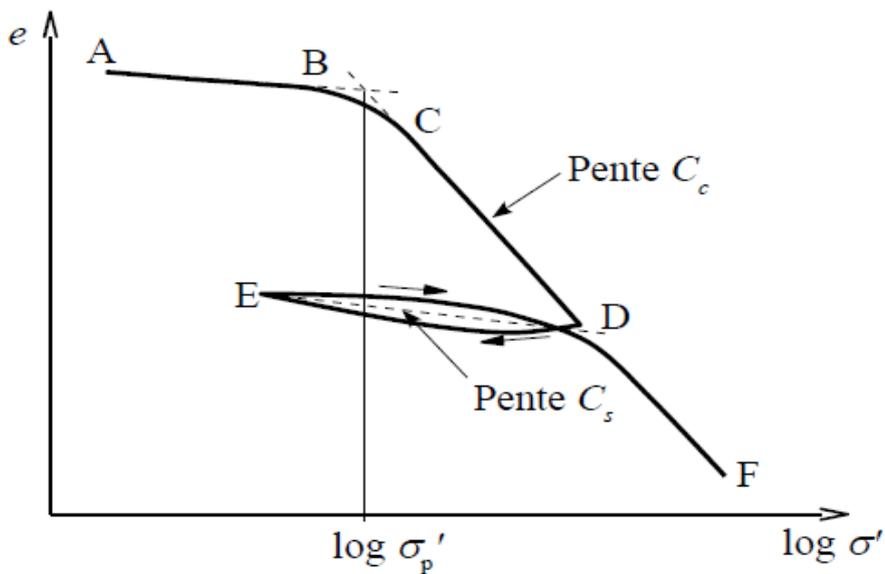


Figure.III.2: courbe de compressibilité dans le plan ($e - \log \sigma'$).

La **courbe de compressibilité** (figure III.2) peut également être tracée sous la forme

$$\varepsilon = \Delta h/h_0 = f(\sigma')$$

Par analogie avec le module de Young on définit le **module Edométriques**

$$E_{oed} = \Delta \sigma' / \Delta \varepsilon$$

Qui peut également être utilisé pour calculer le tassement de la couche de sol :

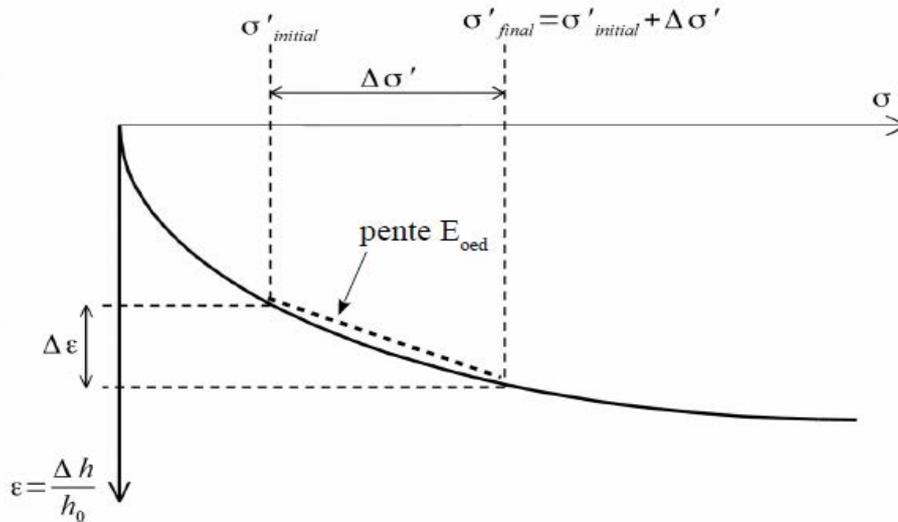


Figure.III.3: courbe de compressibilité dans le plan (ϵ - σ')

III.2.2. Description de l'appareillage:

L'odomètre comporte une cellule contenant l'échantillon et un bâti de chargement.

- *La cellule:* elle est présentée sur la figure. L'échantillon de sol à étudier, de forme cylindrique (section S , hauteur initiale h_0), est placé entre deux pierres poreuses saturées, dans une bague de même diamètre intérieur que l'échantillon.
- *Le bâti de chargement:* il permet d'appliquer sur le piston reposant sur la pierre poreuse supérieure une charge Q et de la maintenir constante pendant un temps donné.

On impose ainsi à l'échantillon :

- une **contrainte totale verticale** constante : $\sigma = Q/S$,
- des **déformations radiales (horizontales) nulles**,
- le système de drainage permet à l'eau de s'évacuer ou d'entrer dans l'échantillon suivant des trajets verticaux ascendant et descendant, tout en permettant au sol de rester saturé.

Des comparateurs permettent de mesurer le **tassement** Δh au cours du temps pour une charge Q appliquée (Daoud, 2020).

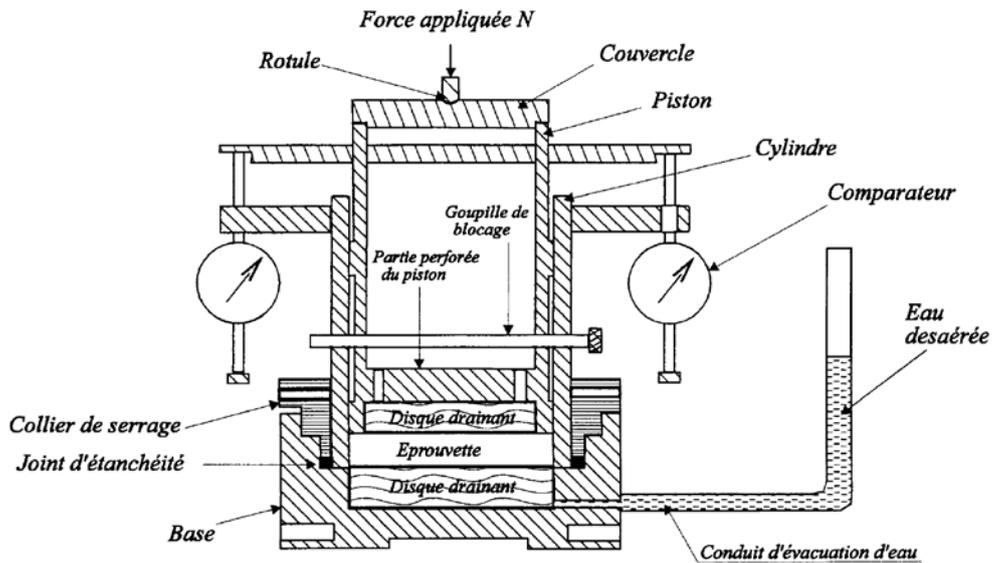


Figure.III.4: cellule odomètre type Terzaghi (norme XP P 94-090-1)

III.3.L'essai de cisaillement à la boîte:

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

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

Paramètres C et ϕ pour différents sols et différents types d'essais :

Deux grandes catégories de sols seront envisagées dans ce mode opératoire :

- Le sol pulvérulent : les graviers et surtout les sables
- Le sol cohérent : argiles et limons

III.3.1.Sol pulvérulents:

Dans ce cas, la droite de colombe passe par l'origine c'est-à-dire que le terme C est nul, l'équation de colombe devient :

$$\tau = \sigma \operatorname{tg} \phi$$

L'angle φ est l'angle de frottement interne, dépend principalement de la compacité du sol, de la forme et de l'état de surface des grains solides.

III.3.2.Sol cohérents:

L'eau joue un rôle fondamentale dans la résistance au cisaillement des sols cohérents. Pour simplifier le problème, seuls seront considérés les sols saturés.

Les valeurs de C et φ obtenus dépendent essentiellement de la vitesse de l'essai et de la perméabilité des sols, car l'un des paramètres déterminants est la pression interstitielle de l'eau, pression qui est directement liée aux conditions de drainage de l'essai.

Dans la pratique de l'essai, des contraintes totales σ s'exerceront sur l'échantillon ; mais les caractéristiques de cisaillement de ce sol cohérent dépendront largement des contraintes intergranulaires ou effectives qui seront supportées par le squelette solide du sol.

Trois types d'essai peuvent être définis suivant qu'il y a drainage ou non, consolidation ou non ; la consolidation consiste à charger l'échantillon en le drainant jusqu'à ce que la pression interstitielle se soit totalement dissipée ($u=0$).

D'après la relation fondamentale « $\sigma = \sigma' + u$ », u est la pression interstitielle de l'eau.

1)-Essai consolidé drainé (C.D):

Dans l'essai consolidé drainé (Figure.III.5), les pressions interstitielles se dissipent au fur et à mesure (essai lent qui correspond au comportement à long terme du sol). Donc à tout instant $u=0$. Cet essai s'interprète classiquement en considérant le critère de Coulomb : la courbe intrinsèque est une droite d'équation $\tau = c' + \sigma' \cdot \tan \varphi'$. Les paramètres résistance au cisaillement (ou caractéristiques inter-granulaires du sol) sont φ' , angle de frottement effectif, et c' , cohésion drainée (Hadji, 2019).

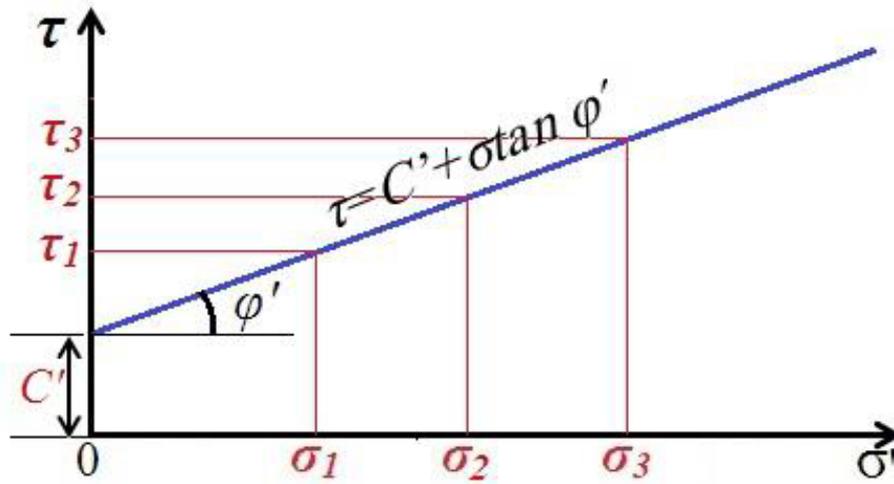
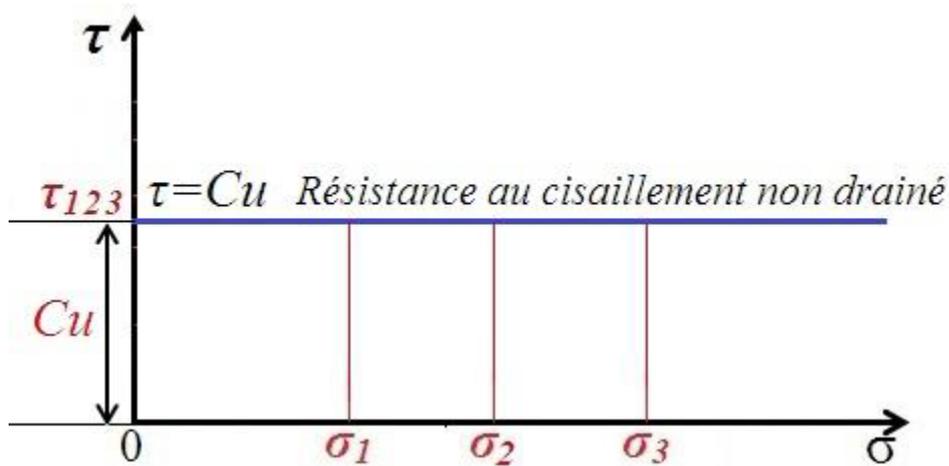


Figure.III.5: Interprétation graphique de l'essai consolidé drainé.

2)-Essai non consolidé non drainé (U.U):

Dans l'essai non consolidé non drainé (Figure.III.6), les pressions interstitielles ne se dissipent pas. Cet essai rapide correspond au comportement à court terme. Pendant l'essai, le volume est constant. Cet essai est interprété en contraintes totales et permet d'estimer « c_u » cohésion non drainée. L'angle de frottement interne ϕ_u est généralement supposé nul. Cet essai est plutôt réalisable pour les sols fins (Hadji ,2019).



FigureIII.6: Interprétation graphique de l'essai non consolidé non drainé.

3)-Essai consolidé non drainé (C.U):

Dans l'essai consolidé (Figure.III.7), non drainé avec mesure de « u », l'échantillon est tout d'abord consolidé sous une contrainte isotrope jusqu'à dissipation des pressions interstitielles; puis le drainage est fermé et la contrainte est augmentée jusqu'à la rupture tout en mesurant les variations de la pression interstitielle. Cet essai, permet d'accéder aux caractéristiques inter-granulaires du sol c' et ϕ' , à condition de l'interpréter en contraintes effectives (Hadjji, 2019).

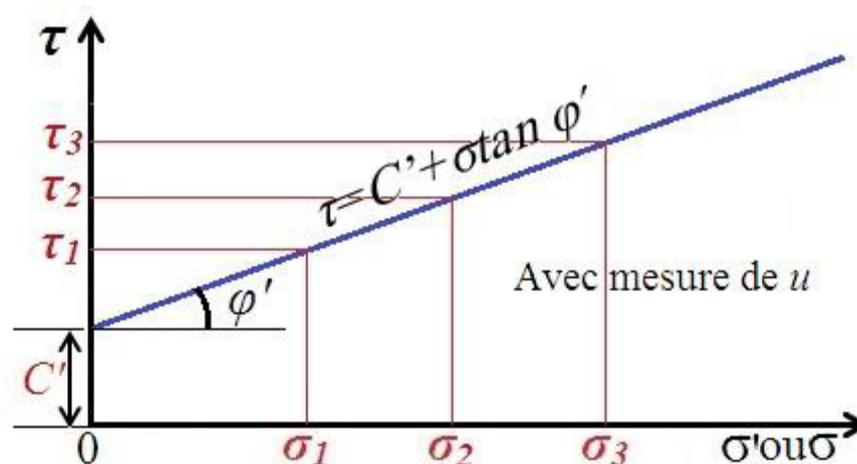


Figure.III.7: Interprétation graphique de l'essai consolidé non drainé.

III.3.3.Principe de l'essai:

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

L'essai consiste à :

- Application sur la face supérieure de l'éprouvette un effort vertical (N) maintenu constant durant la durée de l'essai ($\sigma = N/S$).
- Produire après consolidation de l'éprouvette sous l'effort (N), un cisaillement dans l'éprouvette selon le plan horizontal de glissement des deux demi-boîtes l'une par rapport à l'autre en leur imposant un déplacement relatif ΔL à vitesse constante,
- Mesurer l'effort (T) correspondant ($\tau = T/S$).

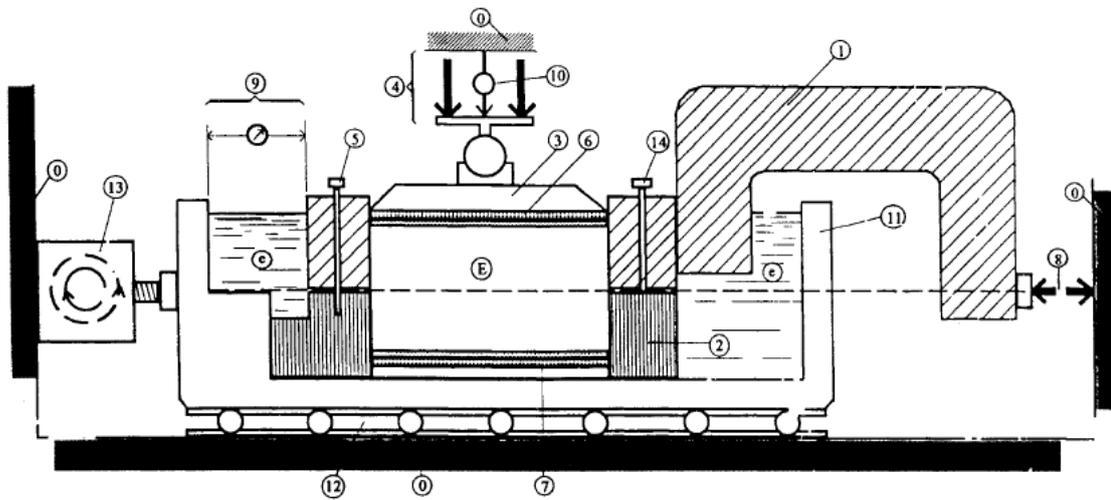
L'essai est réalisé sur une série d'un minimum 3 éprouvettes en faisant augmenter à chaque éprouvette la valeur de l'effort verticale (N) .

La contrainte verticale maximale $\sigma_{max} = N_{max}/S$ appliqué à la série d'éprouvette doit être supérieure à la contrainte effective verticale induite dans le sol après travaux (ARVOR ,2011).

III.3.4.Appareillage:

L'appareillage spécifique à l'essai comprend (figureIII.8) :

- Le bâti
- La boîte de cisaillement
- Le dispositif d'application de l'effort normal sur l'éprouvette.
- Le dispositif produisant le déplacement relatif horizontal entre les deux demi-boîtes.
- Le système de mesurage des efforts, du déplacement et du temps (NF P 94-071-6).



- | | |
|--|---|
| 0 Bâti | 9 Dispositif de mesure du déplacement relatif horizontal δl |
| 1 Demi-boîte supérieure | 10 Dispositif de mesure du déplacement vertical δh |
| 2 Demi-boîte inférieure | 11 Châssis étanche |
| 3 Piston rigide | 12 Glissière sans frottement |
| 4 Dispositif d'application de l'effort vertical N centré sur le piston | 13 Système de déplacement à vitesse constante |
| 5 Solidarisation des demi-boîtes | 14 Vis de soulèvement de la demi-boîte |
| 6 Plaque drainante supérieure | e Eau déminéralisée |
| 7 Plaque drainante inférieure amovible | E Éprouvette de sol |
| 8 Dispositif de mesure de l'effort horizontal T | |

Figure.III.8: schéma de la boîte de cisaillement

III.4.L'essai triaxial:

L'essai de compression triaxiale permet de mieux accéder aux propriétés mécaniques des matériaux, car il affecte l'état de contraintes *in situ*. Cet type d'essai permet de contrôler et de mesurer la pression interstitielle, d'appliquer une gamme de pression de confinement (isotrope ou anisotrope) pour consolider initialement l'échantillon à un état prédéfini. Les différents types d'essai réalisables sont :

- **L'essai CD** : l'éprouvette est considérée sous la pression hydrostatique σ_3 est cisailé à drainage ouvert sous cette même pression. La vitesse de cisaillement est suffisamment faible pour éviter toute création de pression interstitielle. La résistance au cisaillement est exprimée en contrainte effective :

$$\tau' = c' + \sigma' \tan(\phi')$$

Dans le cas d'un sol pulvérulent ($c'=0$), la droite intrinsèque passe par l'origine et :

$$\tau' = \sigma' \tan(\phi')$$

- **L'essai CU** : l'éprouvette est consolidée sous la pression hydrostatique σ_3 est cisailé à drainage fermé sous cette même pression. L'essai revêt deux aspects :
 - Il permet d'étudier la variation de la résistance au cisaillement non drainé du sol en fonction de la pression de consolidation.
 - Il permet de déterminer les caractéristiques c' et ϕ' d'un sol saturé sans avoir recours à l'essai CD et à mesurer la pression interstitielle au cours de cisaillement.

On calcule les contraintes effectives à la rupture au moyen des relations :

$$\sigma'_1 = \sigma_1 - u$$

$$\sigma'_3 = \sigma_3 - u$$

On trace ensuite les cercles de Mohr de contraintes correspondantes.

- **L'essai UU** : l'application la pression hydrostatique σ_3 et le cisaillement sont effectués à drainage fermé. La résistance au cisaillement est :

$$\tau = c_u + \sigma \tan(\phi_u)$$

Remarque : dans le cas très fréquent des sols saturés, on a :

$$\phi_u = 0 \quad \text{d'où} \quad \tau' = c_u$$

cu étant la cohésion non drainé du sol.

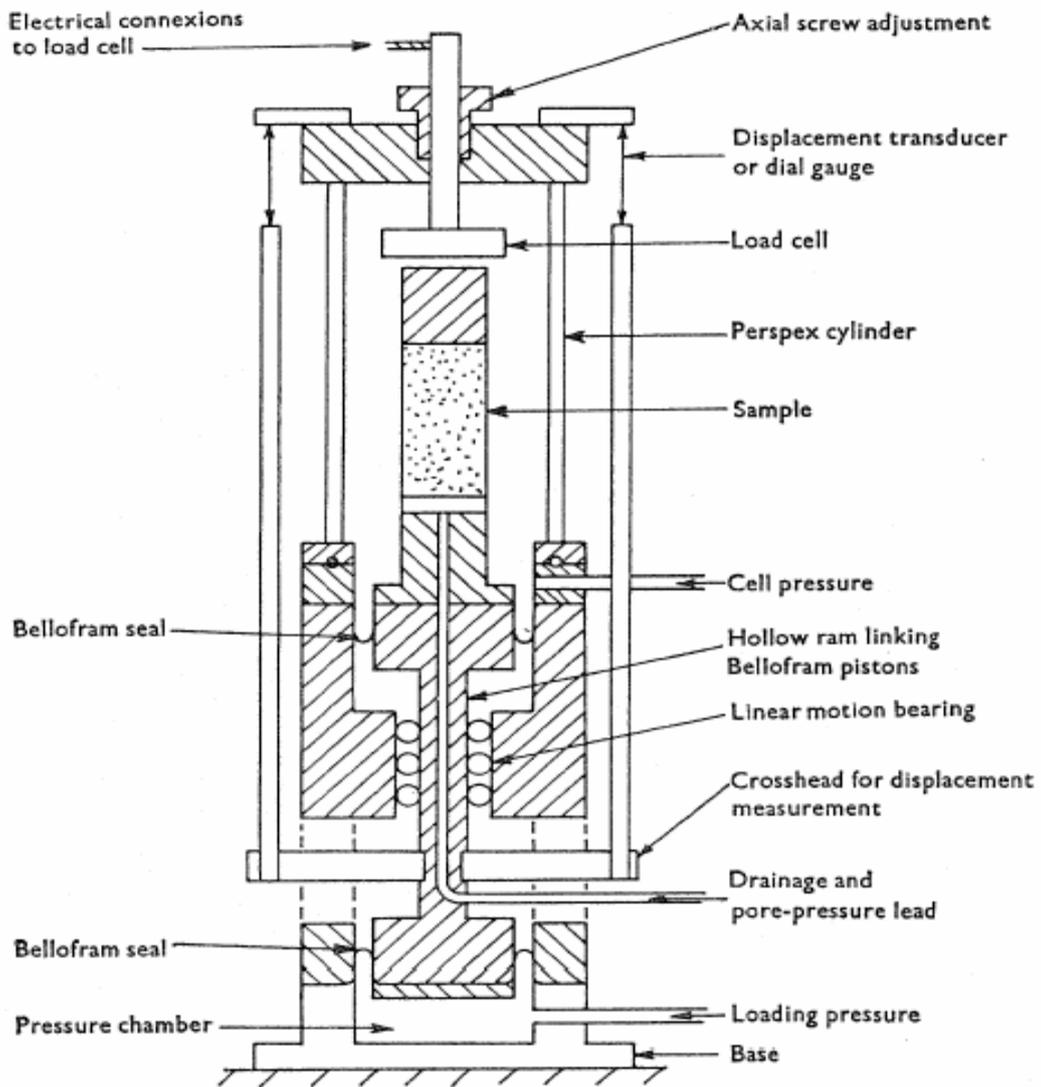


Figure.III.9: Schéma de la cellule Bishop - Wesley (Bishop et Wesley, 1975) (Manh Hai LE, 2008)

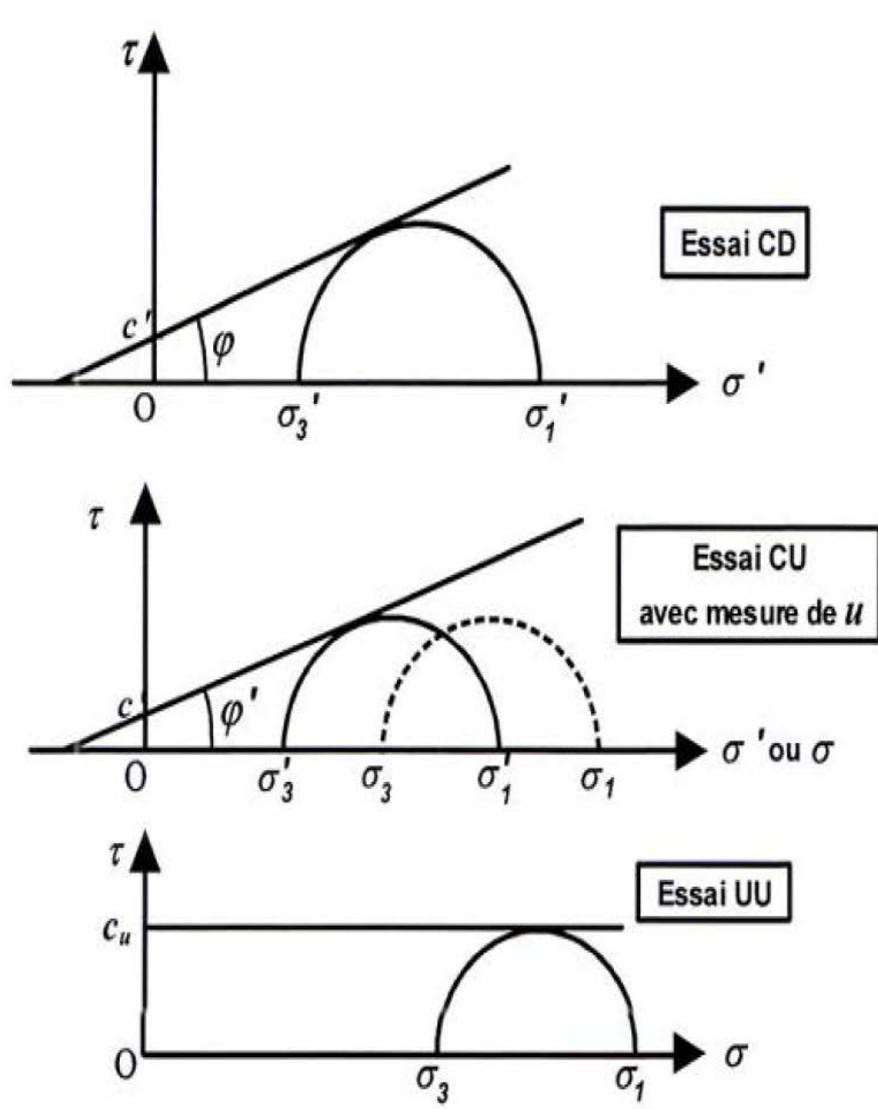


Figure.III.10: Critères de plasticité en contraintes lors de trois différents types d'essais triaxiaux CD- CU- UU (ALGALI,2008)

III.4.1.Principe de l'essai:

L'échantillon cylindrique, est placée dans une cellule où il est soumis à un champ de contrainte uniforme de confinement σ_3 par accroissement de la pression d'eau dans la cellule (l'eau de la cellule ne pénètre pas dans l'échantillon celui-ci étant placé dans une membrane étanche), (figure.III.4.1.1).

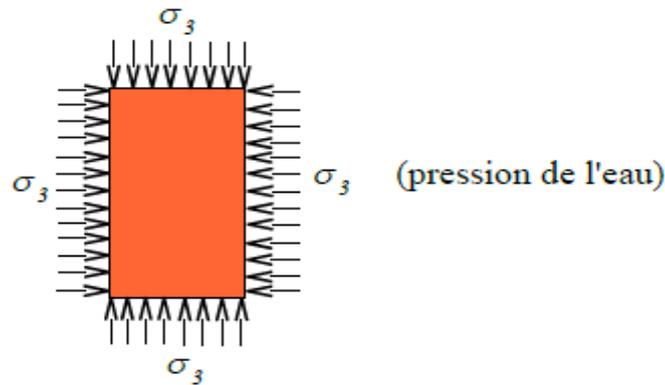


Figure.III.11: essai sous pression de l'eau.

Une fois cette contrainte de confinement appliquée, un piston permet de comprimer l'échantillon dans la direction axiale (c'est-à-dire verticale). Le piston crée alors un accroissement de contrainte dans la direction axiale appelé déviateur de contrainte q . La contrainte axiale totale est alors $\sigma_1 = \sigma_3 + q$ (figure.III.4.1.2).

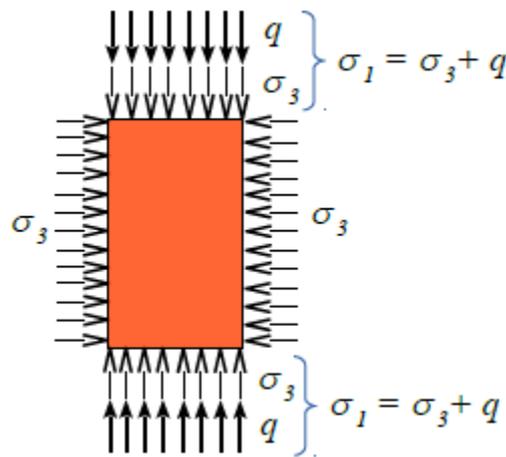


Figure.III.12: résultat de la contrainte axiale

Du fait de la différence de contrainte entre la direction radiale et axiale, égale au déviateur de contrainte q , il se crée au sein de l'échantillon des plans d'inclinaison quelconque des contraintes de cisaillement. En augmentant la force sur le piston et donc la valeur de q , les contraintes de cisaillement sur les plans inclinés augmentent jusqu'à un maximum provoquant la rupture de l'échantillon (figure.III.4.1.3).

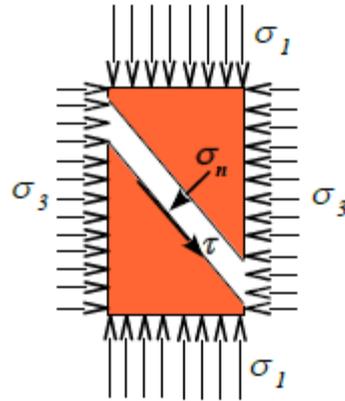


Figure.III.13: la rupture de l'échantillon provoqué par cisaillement

L'essai consiste à faire croître le déviateur de contrainte q (et donc les contraintes de cisaillement) à vitesse de déformation constante jusqu'à la rupture de l'échantillon tout en maintenant la contrainte de confinement σ_3 constante. On en tire la courbe (figure.III.4.1.4).

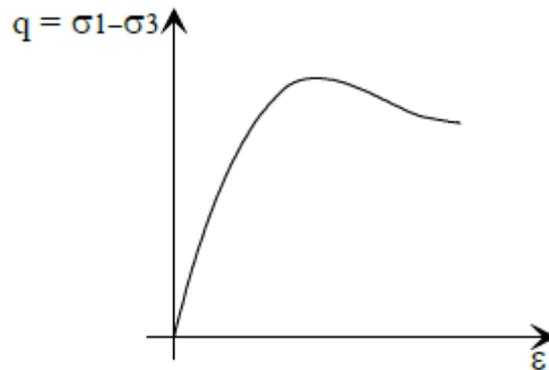


Figure.III.14: la courbe des contraintes de cisaillement

Les cercles de Mohr à la rupture (c'est-à-dire pour les valeurs de σ_1 et σ_3 obtenues pour le maximum de q) tracés dans le plan Mohr sont tangents au critère de rupture de Mohr-Coulomb. Il est donc possible d'en déduire les valeurs de cohésion c et d'angle de frottement φ du matériau testé (figure.III.4.1.5).

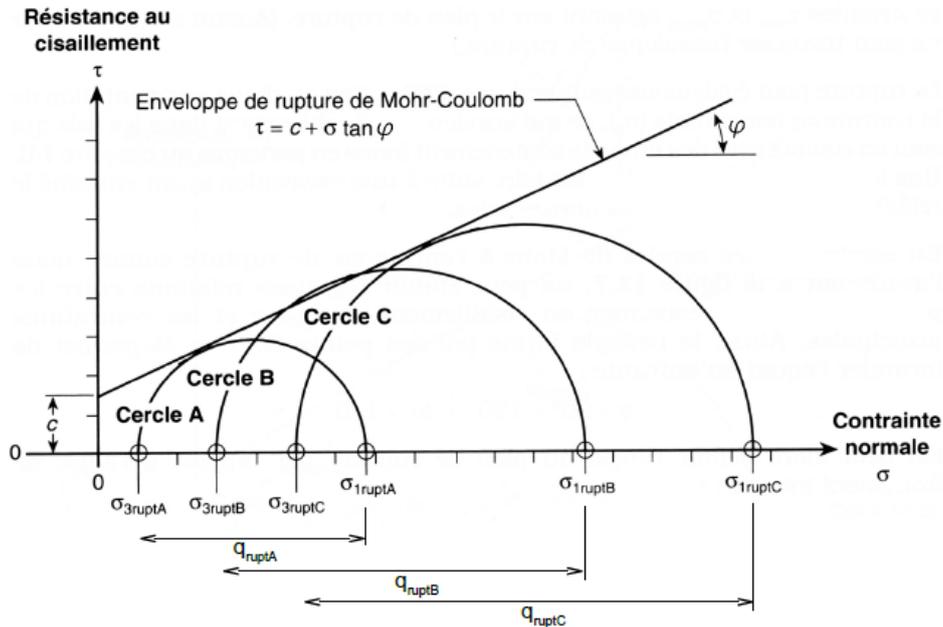


Figure.III.15: le plan Mohr

III.5.Conclusion:

Chaque essai est relié à l'autre, parce que chaque un nous donne des paramètres uniques irremplaçable.

L'essai Œdométriques pour détermination des paramètres de compressibilité (C_c , σ'_p et C_s), l'essai de cisaillement direct pour déterminer les caractéristiques mécanique intrinsèques d'un sol donné à savoir la cohésion et l'angle de frottement (C et φ) et l'essai triaxial est développé pour contourner les limites de l'essai de cisaillement direct. Quoiqu'il soit plus complexe, il est le plus approprié pour déterminer les paramètres de la courbe intrinsèque d'un sol fin.

Et pour finir il nous donne une clé pour étudier le comportement mécanique d'un matériel granulaire.

Chapitre IV

Présentation des Essais

IV.1.Introduction:

Dans ce chapitre, on va présenter les essais qu'on a effectués dans le Laboratoire des Travaux Publics de l'Ouest (LTPO) et le laboratoire du département de génie civil. Les essais réalisés sont de deux Types : Essais d'identification et Essais Mécaniques.

Les matériaux utilisés sont l'argile ramenée de Medrissa qui est utilisée dans la briqueterie de la SARL GRECO et le verre broyé dont les dimensions sont inférieures à $630\mu\text{m}$. Ce dernier a été ajouté à l'argile naturelle pour préparer des mélanges (Argile-Verre) à différentes proportions (10%,20%,30%).

IV.2.Prélèvement de l'argile naturelle:

En compagnie du géologue du LTPO, nous avons visité la carrière d'argile (Figure.IV.1) située dans la commune de Medrissa (Wilaya à Tiaret) (Voir image Google earth sur la (Figure.IV.2) et dans laquelle on a procédé au prélèvement d'échantillons d'argile. Et leur mise en sacs (Figure.IV.3).



Figure.IV.1: Carrière d'argile de Medrissa



Figure.IV.2: carte de localisation de la carrière d'argile de Medrissa



Figure.IV.3: prélèvement d'argile

IV.3. Etude expérimentale:**IV.3.1. Essais d'identifications:**

Essais d'identifications sur l'argile naturelle de Medrissa ont été effectués selon les normes françaises AFNOR.

IV.3.1.1. Les limites d'ATTERBERG (NFP 94-051):

Les limites de consistance, ou limites d'Atterberg constituent un indice important en géotechnique. Ces limites sont mesurées avec un appareillage normalisé (Figure. IV.4) sur le mortier, c'est-à-dire la fraction de sol qui passe au tamis de 400 μm .

Il définit deux limites:

-la limite de liquidité w_L qui sépare l'état liquide de l'état plastique

-la limite de plasticité w_P qui sépare l'état plastique de l'état solide

I_p est la différence entre les valeurs des limites de liquidité et de plasticité

Indice de plasticité $I_p = w_L - w_P$



Figure.IV.4: Détermination des limites d'Atterberg

Les deux tableaux suivants montrent les résultats obtenus pour les deux limites d'Atterberg w_L et w_P .

Tableau.IV.1: Résultats de l'essai de limite de liquidité de l'argile naturelle

	1 ^e ESSAI		2 ^e ESSAI		3 ^e ESSAI	
Nombre de coups	16		21		26	
N° de la tare	117	H6	U4	N60	AHY	H3
Poids total humide (g)	5,53	6,17	6,00	5,98	5,67	6,17
Poids total sec (g)	4,92	5,13	5,21	5,08	4,81	5,29
Poids de la tare (g)	3,99	3,54	3,99	3,68	3,46	3,90
Poids de l'eau	0,61	1,04	0,79	0,90	0,86	0,88
Poids de sol sec (g)	0,93	1,59	1,22	1,40	1,35	1,39
Teneur en eau(%)	65,59	65,41	64,75	64,29	63,70	63,31
La moyenne	65,50		64,52		63,51	

Tableau.IV.2: Résultats de l'essai la limite de plasticité de l'argile naturelle

	1 ^e ESSAI	2 ^e ESSAI	3 ^e ESSAI	4 ^e ESSAI
N° de la tare	58	59	SA	AD
Poids total humide(g)	4,94	4,43	5,06	4,25
Poids total sec (g)	4,74	4,23	4,84	4,03
Poids de la tare (g)	3,97	3,5	3,99	3,16
Poids de l'eau	0,2	0,2	0,22	0,22
Poids de sol sec (g)	0,77	0,73	0,85	0,87
Teneur en eau (%)	25,97	27,40	25,88	25,29
La moyenne	26,69		25,58	
	26,14			

On peut donc déterminer la limite de liquidité selon la méthode indiquée dans la (figure.IV.5), ce qui donne les résultats représentés dans le (tableau.IV.3).

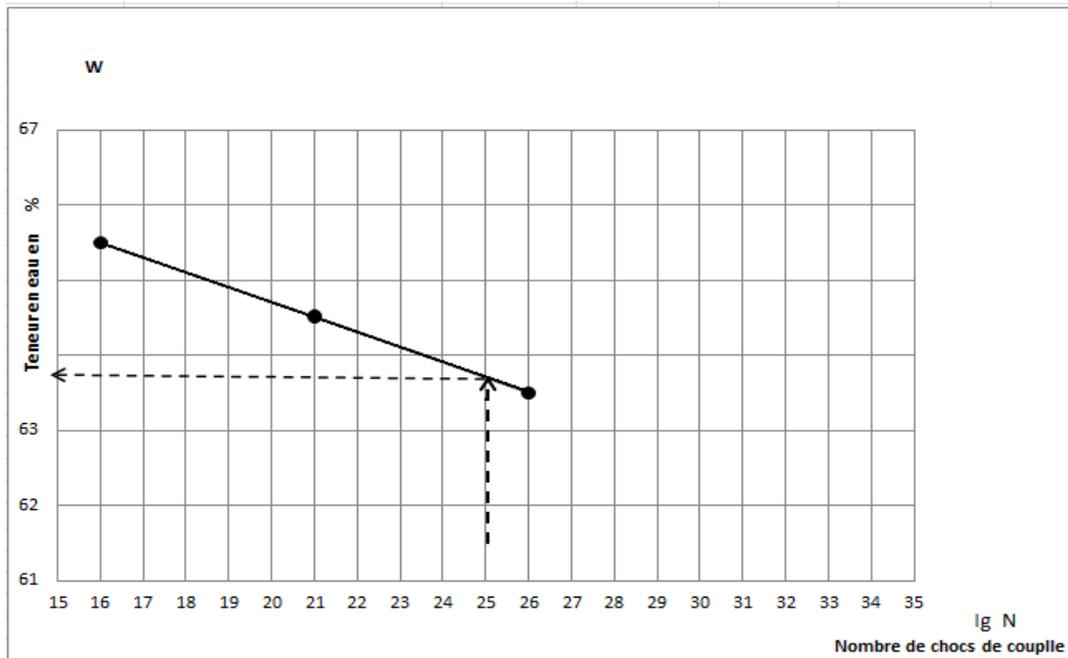


Figure.IV.5: Limite de liquidité à la coupelle de Casagrande

Tableau.IV.3: Résultats de Limite de liquidité à la coupelle de Casagrande

Mesures n°	1	2	3
Teneur en eau (%)	65,50	64,52	63,51
Nombre de coups N	16	21	26

Dans le (Tableau.IV.4), on résume les résultats finaux.

Tableau.IV.4: Les résultats d'Atterberg

Teneur en eau de plasticité (%)	W=25.97	Wp=26.69	W=25.88	Wp=25.58
	W=27.40		W=25.29	
Limite de liquidité Wl=63.72%	Indice de plasticité			
	Ip = Wl - Wp = 63.72-26.14=37.58%			
Limite de plasticité: Wp=26.14%	Donc, Ip=37.58			

Classification de sol selon le diagramme de Casagrande:

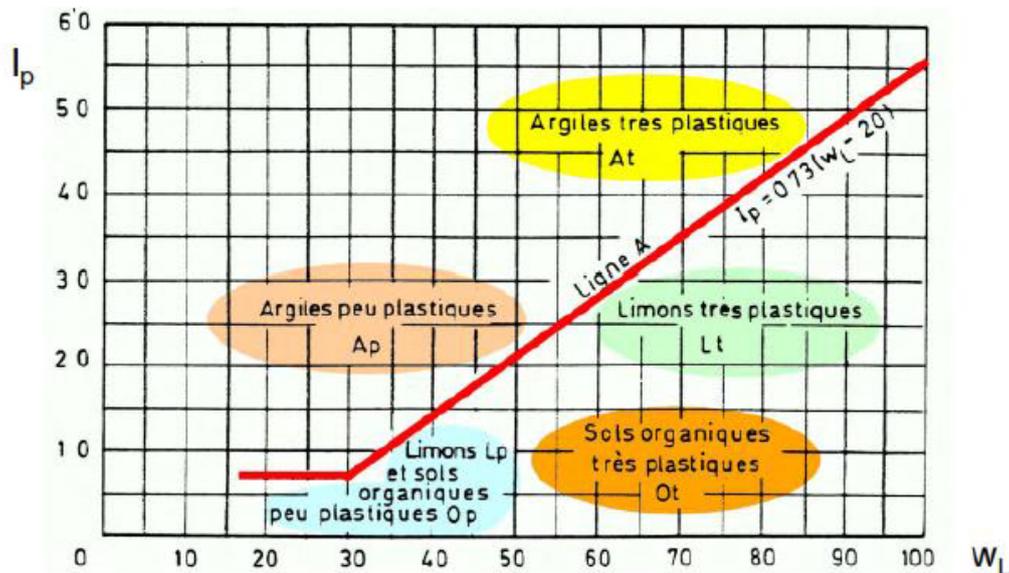


Figure.IV.6: classification des sols fins, Diagramme de plasticité (selon L.C.P.C)

Puisque notre échantillon a une limite de liquidité de 63,72 % et un indice de plasticité de l'ordre de 37,58 et d'après le diagramme de Casagrande, notre sol est classé comme étant une argile très plastique.

IV.3.1.2. Analyse granulométrique:

L'analyse granulométrique des sols fait l'objet de deux normes :

-la norme (NF P94-056) concerne l'analyse granulométrique par tamisage des éléments des dimensions supérieures à 80 μ m.

-la norme (NF P94-057) traite de l'analyse granulométrique par sédimentation des éléments passant à travers le tamis le tamis de 80 μ m d'ouverture.

a) Analyse par tamisage (NF P94-056):

Le but de ce test est de déterminer les éléments du sol par le poids de la distribution granulométrique.

L'essai consiste à séparer les grains agglomérés d'une masse connue de matériau par brassage sous l'eau, à fractionner ce sol, une fois séché, au moyen d'une série des tamis et à peser successivement le refus cumulé sur chaque tamis. La masse de refus cumulé sur chaque tamis est rapportée à la masse totale sèche de l'échantillon soumis à l'analyse.

L'essai s'effectue sur une masse 500 g après l'avoir séché pendant 24 heures à l'étuve à une température de 105°C.

Les tailles des mailles des tamis utilisés sont les suivantes : 5mm ,4 mm, 2mm, 1mm ; 0.5mm; 0.4mm; 0.315mm ; 0.2mm0.1 mm, 0.08mm

b) Analyse par sédimentation:

L'analyse granulométrique par sédimentation est un essai complémentaire de l'analyse granulométrique.

Les particules inférieures à 80 μm séparées du reste du sol par tamisage sont mises en suspension dans de l'eau additionnée d'une défloculation. Les particules sédimentent à différentes vitesses en relation avec leur taille. Au moyen d'un densimètre, est mesurée l'évolution dans le temps de la masse volumique de la solution et de la profondeur d'immersion de l'appareil (Figure.IV.7).



Figure.IV.7: Dispositif de l'essai de sédimentométrie

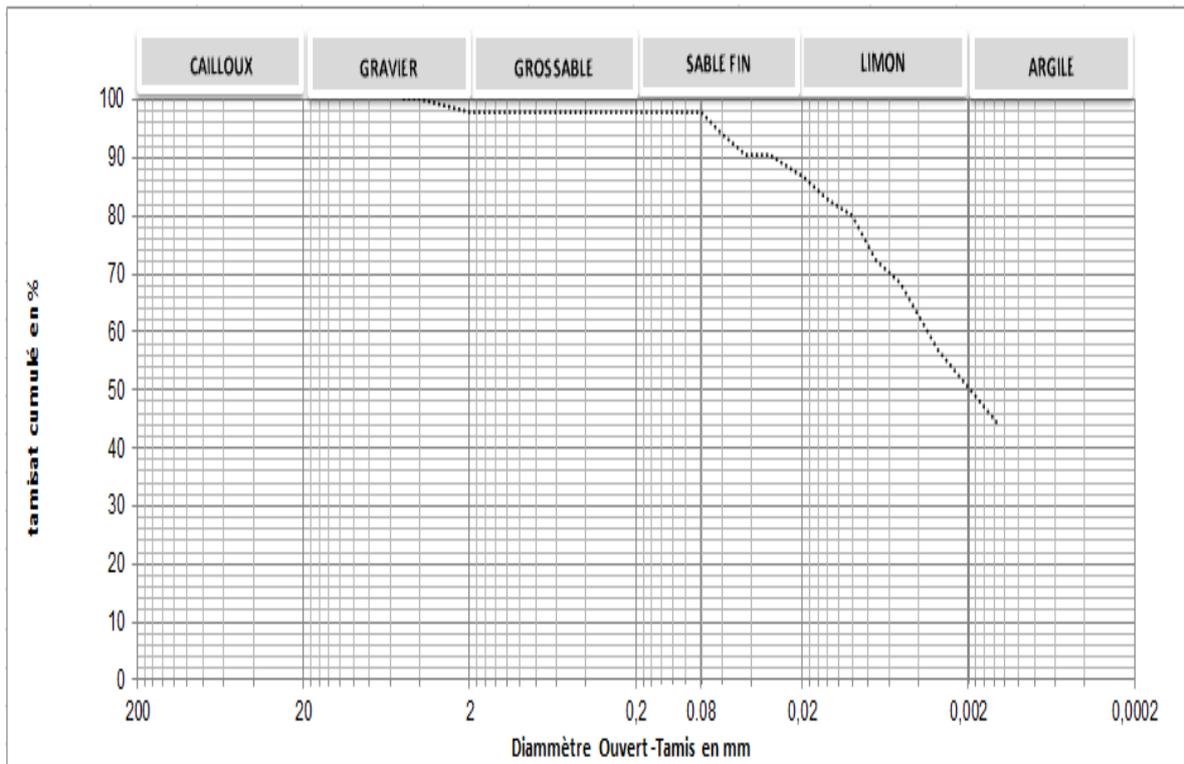


Figure. IV.8: Courbe granulométrique de l'argile

IV.3.1.3. Essai bleu de méthylène NFP 94-068:

L'essai au bleu de méthylène permet d'apprécier globalement l'activité de la fraction argileuse d'un sol en mesurant la surface interne et externe des grains argileux. Pour ce faire, on fixe, sur les grains d'argile, des molécules de bleu de méthylène et par un test simple, on évalue la quantité de bleu fixé. On en déduit la valeur au bleu du sol ou VBS ; qui est un indicateur essentiel dans la classification des sols concernés pour les travaux et terrassement et les sols destinés au assises des chaussées...

L'essai au bleu de méthylène est pratiqué sur la fraction granulaire 0/2 mm des sables courants ou sur les fillers (0/0.125 mm) contenus dans un sable fillerisé, un gravillon ou un tout venant. Il a pour but de révéler la présence de fines de nature argileuse et d'en déterminer la concentration.

Les principales étapes de l'essai sont indiquées dans la (figure.IV.9).

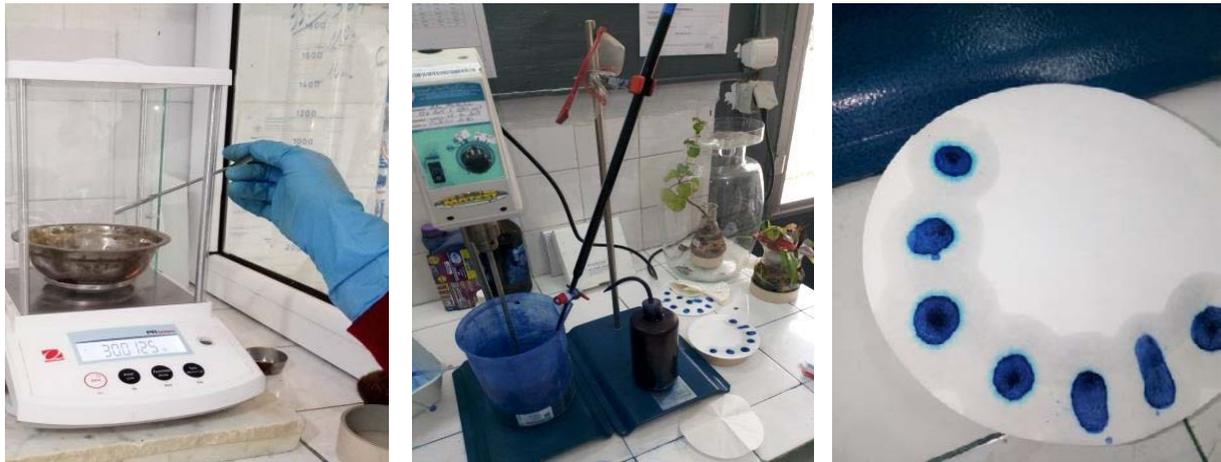


Figure.IV.9 : Les étapes de l'essai de bleu de méthylène

Le tableau suivant présente les résultats de l'essai VBS.

Tableau.IV.5: Résultats de l'essai de VBS pour l'argile

Nature	N° ECH	Volume (ml)	C	Fraction (%)	VBS
Argile	P1	100	1	100	3.33

Classification du sol selon GTR:

Puisque notre sol comporte 98% des éléments fins avec un $D_{max} = 4\text{mm} < 50\text{mm}$, d'une part et du fait que son indice de plasticité est de 37, d'autre part, donc notre sol est classé dans la classe A et sous-classe 3 (A3).

Tableau.IV.6: Tableau de classification des sols fins (GTR).

Classement selon la nature				Classement selon l'état hydrique		
Paramètres de nature Premier niveau de classification	Classe	Paramètres de nature Deuxième niveau de classification	Sous classe fonction de la nature	Paramètres d'état	Sous classe fonction de l'état	
D _{max} ≤ 50 mm et T _{amisat} à 80 μm > 35%	A	VBS ≤ 2,5 ^(*) ou I _p ≤ 12	A₁ Limos peu plastiques, loess, silt alluvionnaires, sables fins peu pollués, arènes peu plastiques...	IP _I ^(*) ≤ 3 ou W _n ≥ 1,25 W _{OPN}	A ₁ th	
				3 < IP _I ^(*) ≤ 8 ou 1,10 ≤ W _n < 1,25 W _{OPN}	A ₁ h	
				8 < IP _I ^(*) ≤ 25 ou 0,9 W _{OPN} ≤ W _n < 1,1 W _{OPN}	A ₁ m	
				0,7 W _{OPN} ≤ W _n < 0,9 W _{OPN}	A ₁ s	
				W _n < 0,7 W _{OPN}	A ₁ ts	
		12 < I _p ≤ 25 ^(*) ou 2,5 < VBS ≤ 6	A₂ Sables fins argileux, limons, argiles et marnes peu plastiques arènes...	IP _I ^(*) ≤ 2 ou I _c ^(*) ≤ 0,9 ou W _n ≥ 1,3 W _{OPN}	A ₂ th	
					2 < IP _I ^(*) ≤ 5 ou 0,9 ≤ I _c ^(*) < 1,05 ou 1,1 W _{OPN} ≤ W _n < 1,3 W _{OPN}	A ₂ h
					5 < IP _I ^(*) ≤ 15 ou 1,05 < I _c ^(*) ≤ 1,2 ou 0,9 W _{OPN} ≤ W _n < 1,1 W _{OPN}	A ₂ m
					1,2 < I _c ^(*) ≤ 1,4 ou 0,7 W _{OPN} ≤ W _n < 0,9 W _{OPN}	A ₂ s
					I _c ^(*) > 1,3 ou W _n < 0,7 W _{OPN}	A ₂ ts
		25 < I _p ≤ 40 ^(*) ou 6 < VBS ≤ 8	A₃ Argiles et argiles marnées, limons très plastiques...	IP _I ^(*) ≤ 1 ou I _c ^(*) ≤ 0,8 ou W _n ≥ 1,4 W _{OPN}	A ₃ th	
					1 < IP _I ^(*) ≤ 3 ou 0,8 ≤ I _c ^(*) < 1 ou 1,2 W _{OPN} ≤ W _n < 1,4 W _{OPN}	A ₃ h
					3 < IP _I ^(*) ≤ 10 ou 1 < I _c ^(*) ≤ 1,15 ou 0,9 W _{OPN} ≤ W _n < 1,2 W _{OPN}	A ₃ m
					1,15 < I _c ^(*) ≤ 1,3 ou 0,7 W _{OPN} ≤ W _n < 0,9 W _{OPN}	A ₃ s
					I _c ^(*) > 1,3 ou W _n < 0,7 W _{OPN}	A ₃ ts
		I _p > 40 ^(*) ou VBS > 8	A₄ Argiles et argiles marnées, très plastiques...	Valeurs seuils des paramètres d'état, à définir à l'appui d'une étude spécifique	A ₄ th	
A ₄ h						
A ₄ m						
A ₄ s						

IV.3.1.4 : Essai d'évaluation de carbonates (NA-2789) caco3:

L'essai consiste à déterminer le volume de dioxyde de carbone (CO₂) dégagé sous l'action d'acide chlorhydrique en excès (dans des conditions de température et de pression atmosphérique connues) par un échantillon préparé pour l'essai.

Le tableau suivant présente les résultats :

Tableau.IV.7: Taux de carbonates présents dans l'argile

Nature	ECH N°	Volume (Cm3)	Masse m ₂ (g)	Teneur en calcaire (%)
ARGILE	P1	5	0.02	4

IV.3.1.5: Détermination de la teneur en sulfates (NA-16002-5042):

L'essai a révélé l'absence de sulfates dans l'argile (tableau.IV.7) (M'raiem, 2019)



Figure.IV.10: Dispositif d'essai de la teneur en sulfates

Le tableau suivant présente les résultats:

Tableau.IV.8: Résultats de l'essai de teneur en sulfates.

Nature	N° ECH	Profondeur (m)/PK	Taux de sulfates (mg/kg)
ARGILE	P01	/	NUL

IV.3.1.6: Poids spécifiques des gains solides NA255/1990:

Le poids spécifique est déterminé sur un échantillon nettoyé, après avoir extrait les impuretés selon les procédures décrites pour chaque classe de grain.

Le résultat trouvé est : $Y_s = 2.46 \text{ g/cm}^3$

IV.3.1.7: Détermination de la teneur en eau pondérale des sols NFP94-050-91:

En appliquant la norme en vigueur, on a trouvé une teneur en eau naturelle de l'ordre de 17,89%.

IV.3.2.Essais mécaniques:

IV.3.2.1.Essai Proctor normal (NA 5262, NF P 94-093):

L'essai Proctor a pour but de déterminer les caractéristiques de compactage d'un matériau.

Ces caractéristiques sont la teneur en eau optimale et la masse volumique sèche maximale. Selon l'énergie de compactage appliquée à l'éprouvette, on distingue l'essai Proctor normal et l'essai Proctor modifié qui conduisent à des couples de valeurs différentes.

Les deux essais sont identiques dans leur principe, seules diffèrent les valeurs des paramètres qui définissent l'énergie de compactage appliquée.

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

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

Les étapes de l'essai sont indiquées selon la (figure.IV.11):



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

Figure.IV.11: les étapes de l'essai Proctor normal :

- (a) Imbibition de l'argile pendant 24h; (b) Pesée pour chaque couche ; (c) Préparation du moule ; (d) Mise en place du moule dans le bâti de la dame Proctor ; (e) compactage ; (f) Pesée et paraffinage des éprouvettes.

Tableau.IV.9: Les Résultats de l'essai Proctor réalisé sur l'Argile Naturelle

Poids d'eau ajoutée à chaque compactage	Essai n : 01	Essai n : 02	Essai n : 03	Essai n : 04
Poids total humide(g)	5369	5456	5481	5427
Poids du moule (g)	3584	3584	3584	3584
Poids du sol humide (g)	1785	1872	1897	1843
Poids du sol sec (g)	1498,72	1536,67	1546,15	1470,27
Volume du moule	948,56	948,56	948,56	948,56
Densité sèche t/m3	1,58	1,62	1,63	1,55
N° de la tare	1	2	3	4
Poids total humide (g)	400	400	400	400
Poids total sec (g)	345	338	336	330
Poids de la tare (g)	57	54	54	54
Poids de l'eau (g)	55	62	64	70
Poids du sol sec (g)	288	284	282	276
Teneur en eau (%)	19,10	21,83	22,70	25,36
Moyenne				

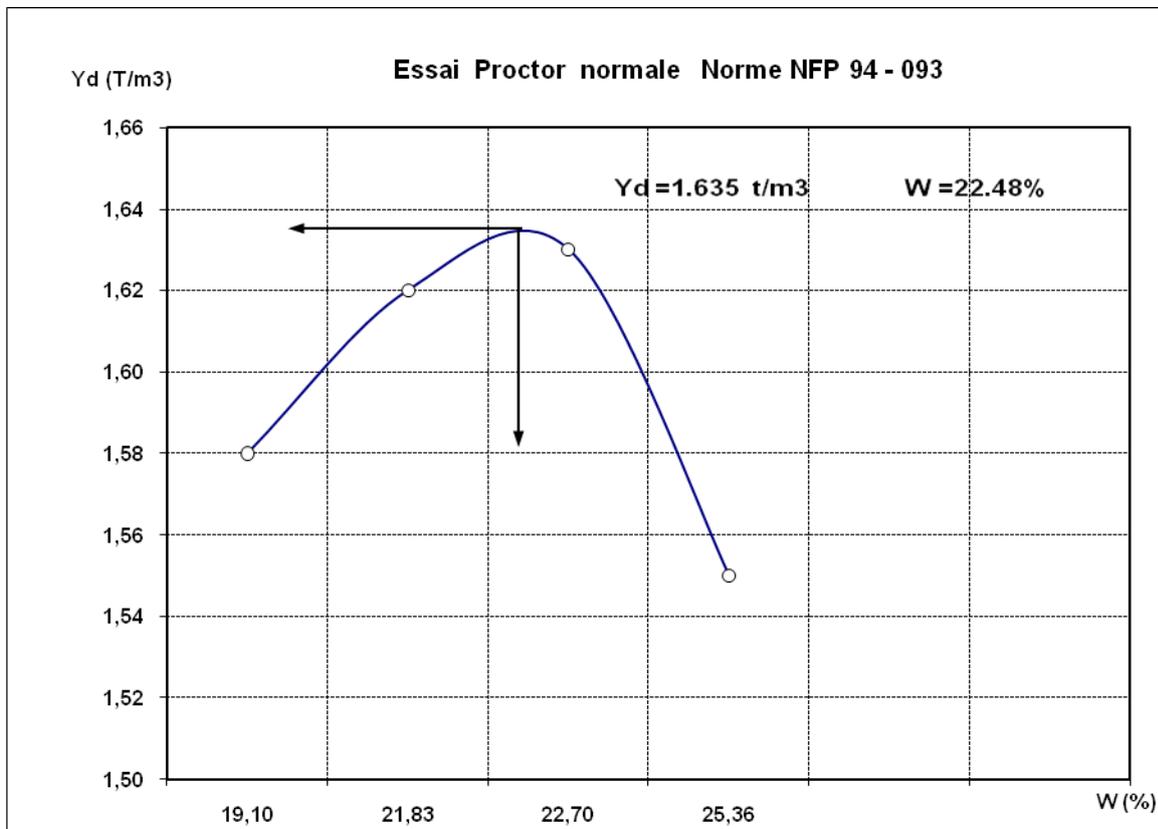


Figure.IV.12: Courbe Proctor Normal pour l'argile naturelle

*** L'argile traitée avec 10% de verre :**

En se basant sur les résultats de (Guezoul et Bendjazia, 2019), la teneur en eau optimale pour le mélange d'Argile et 10% de verre est de 21% (soit celle de l'argile naturelle diminuée de 2%, puisque le verre n'absorbe pas de l'eau). Le tableau suivant représente le résultat de confirmation.

Tableau.IV.10: résultat de l'essai Proctor normal.

Pourcentage de verre (%)	Teneur en eau W(%)	Densité sèche(t/m ³)
10	21	1.65

*** L'argile traitée avec 20% de verre:**

De même pour le mélange d'argile + 20% de verre, la teneur en eau optimale est donnée dans le tableau suivant.

Tableau.IV.11: résultat de l'essai Proctor normal.

Pourcentage de verre (%)	Teneur en eau W(%)	Densité sèche(t/m ³)
20	18.69	1.70

*** L'argile traitée avec 30% de verre:**

La teneur en eau optimale est donnée dans le tableau suivant.

Tableau.IV.12: résultat de l'essai Proctor normal.

Pourcentage de verre (%)	Teneur en eau W(%)	Densité sèche (t/m ³)
30	19.31	1.75

IV.3.2.2.1.Essai de cisaillement direct:

Dans le cadre de notre étude, nous avons effectué 2 types d'essais:

- *Essai non consolidé non drainé (U.U) :*

L'essai étant rapide, la représentation ne peut se faire qu'en contraintes totales. Il ne permet pas la détermination des paramètres effectifs même en mesurant la pression interstitielle.

- *Essai Consolidé Drainé (C.D) :*

L'Essai très lent conduit en contraintes effectives. La vitesse d'essai est de l'ordre de 0,002 mm/min fixée pour l'ensemble des essais sur les différents mélanges. Une telle vitesse a été choisie en fonction de t_{100} (ajouter les calculs).

La (figure.IV.13) représente l'appareil utilisé pour les essais de cisaillement direct.

Sur la (figure.IV.14), on représente les différentes étapes suivies pour la réalisation des essais.



Figure IV.13 : Appareil de cisaillement rectiligne



(a)



(b)



(c)



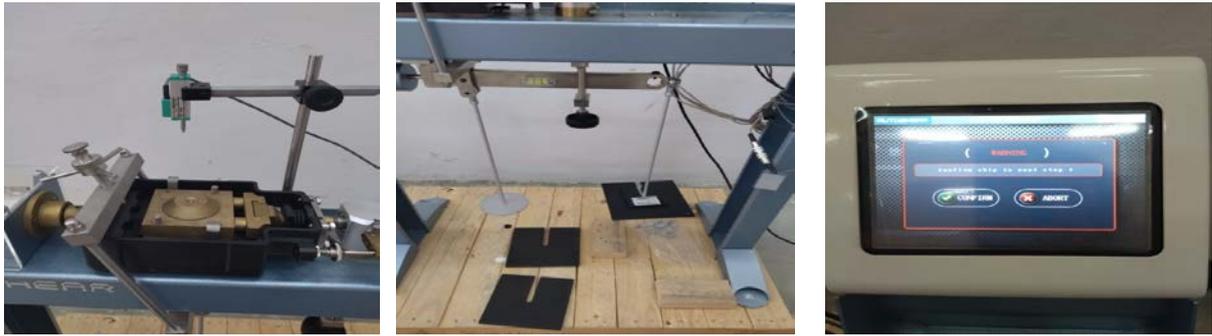
(d)



(e)



(f)



(g)

(h)

(i)

Figures IV.14: les étapes de l'essai de cisaillement à la boîte de casa grande :

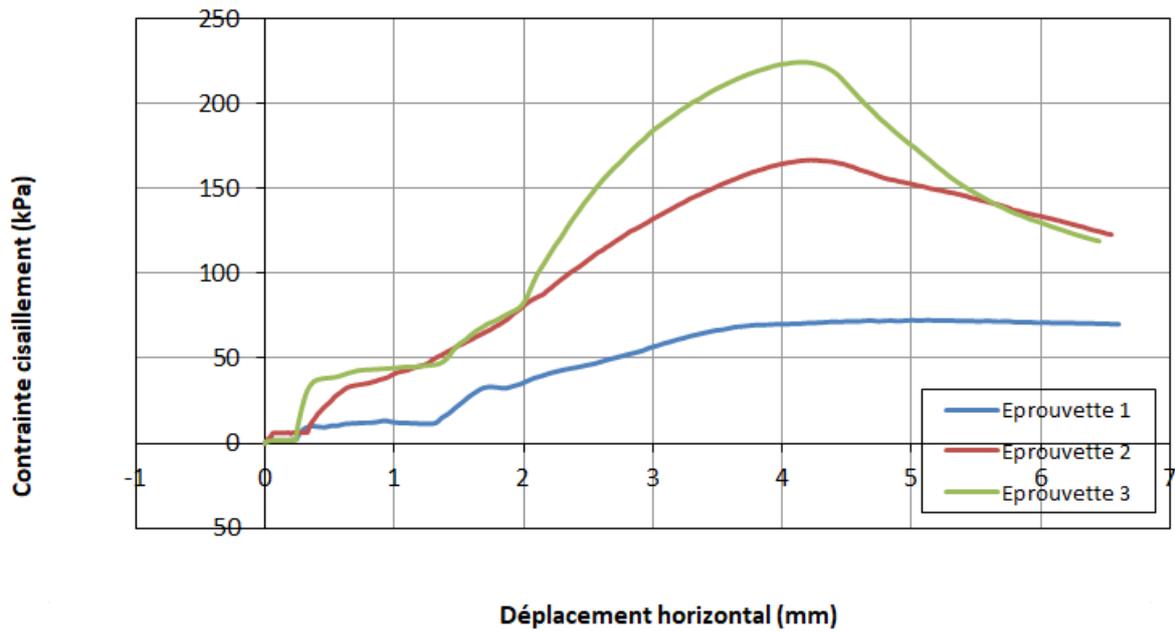
- (a) Enlèvement de la paraffine; (b) Taille de l'échantillon; (c) Arasage de l'éprouvette des deux côtés ; (d) Préparation de la cellule; (e) et (f) Mise en place de l'éprouvette dans la cellule ; (g) Mise en place de la cellule complète dans le compartiment de l'appareil de cisaillement; (h) Application des charges; (i) Lancement de l'essai.

Expression des résultats:

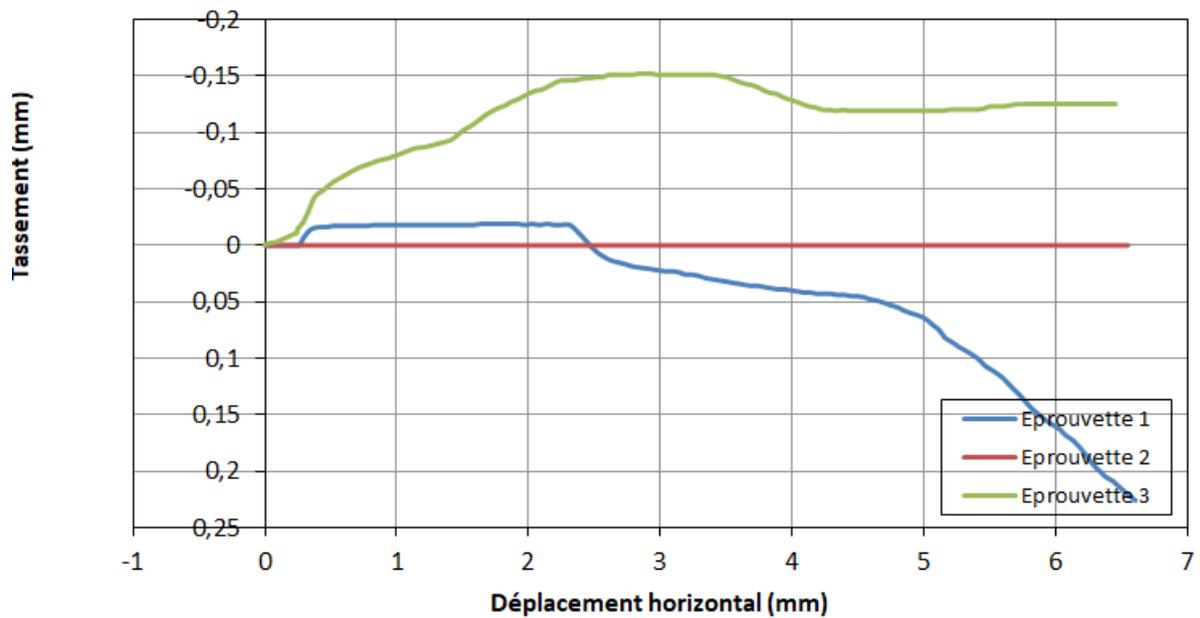
IV.3.2.2.2 : Essais de cisaillement direct:

- *Essais de cisaillement direct en conditions non consolidé non drainé (UU) :*

Les résultats des essais de cisaillement direct en conditions UU réalisés sur des éprouvettes de l'argile naturelle, sont présentés dans les figures suivantes. Les courbes ont été tracées par le logiciel de traitement des résultats. Il est à noter qu'il avait un problème d'acquisition du déplacement vertical pour la 2^{ème} contrainte ($\sigma_N=121$ kPa), c'est la raison pour laquelle on a une droite horizontale à l'origine.



(a)



(b)

Figure.IV.15 : Résultats des essais de cisaillement (UU) réalisés sur les échantillons de l'argile naturelle : (a) contraintes de cisaillement (b) déplacement horizontal

La courbe intrinsèque tracée également par le logiciel (Figure.IV.16) donne les résultats suivants : $c_u = 47,6 \text{ kPa}$ $\phi_u = 36,5^\circ$

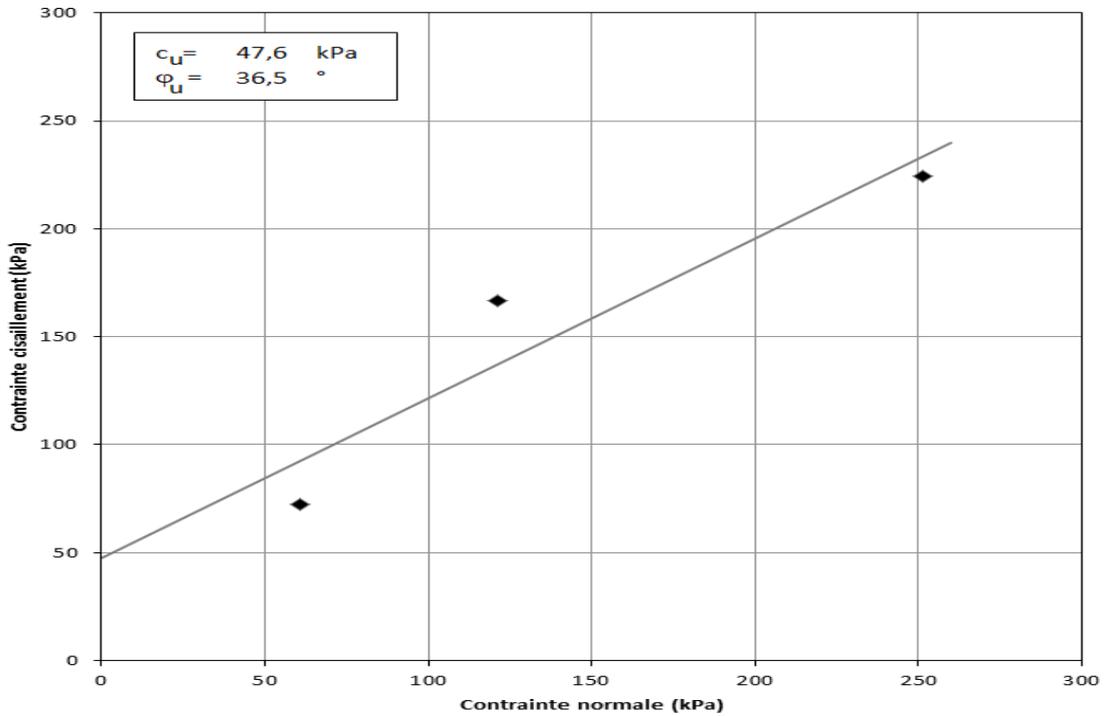
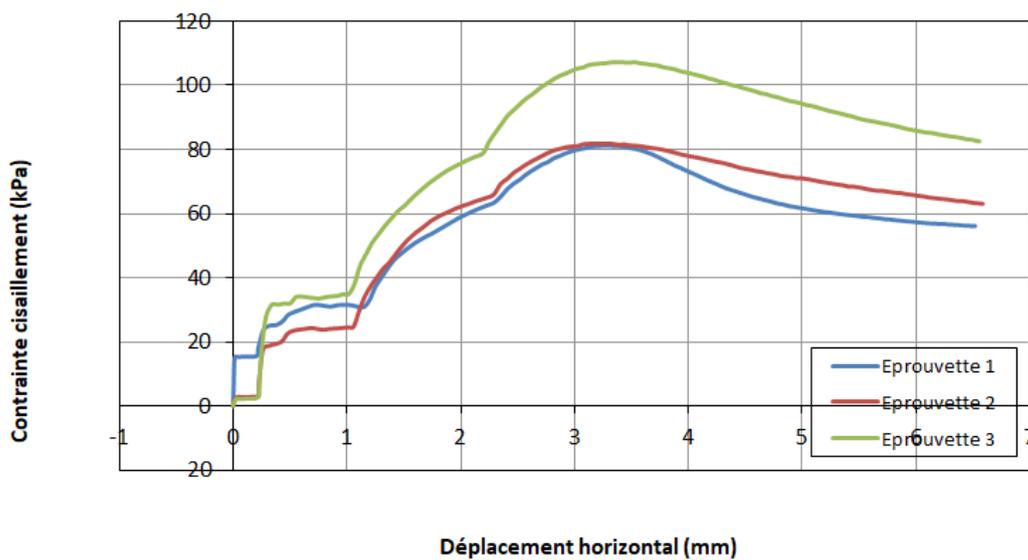
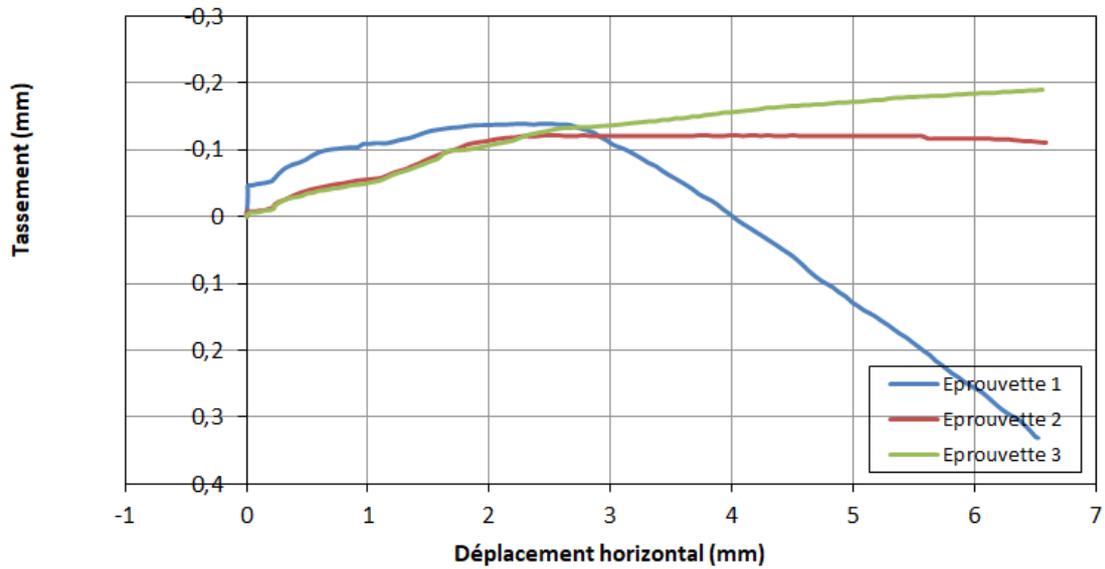


Figure.IV.16 : Courbe intrinsèque relative à l'argile naturelle

Dans les figures qui suivent, on présente les résultats des essais de cisaillement réalisés sur les mélanges (argile-verre broyé) à différents pourcentages (10%, 20% et 30%) de verre.



(a)



(b)

Figure.IV.17 : Résultats des essais de cisaillement (UU) réalisés sur les éprouvettes de l'argile +10% de verre : (a) contraintes de cisaillement (b) déplacement horizontal

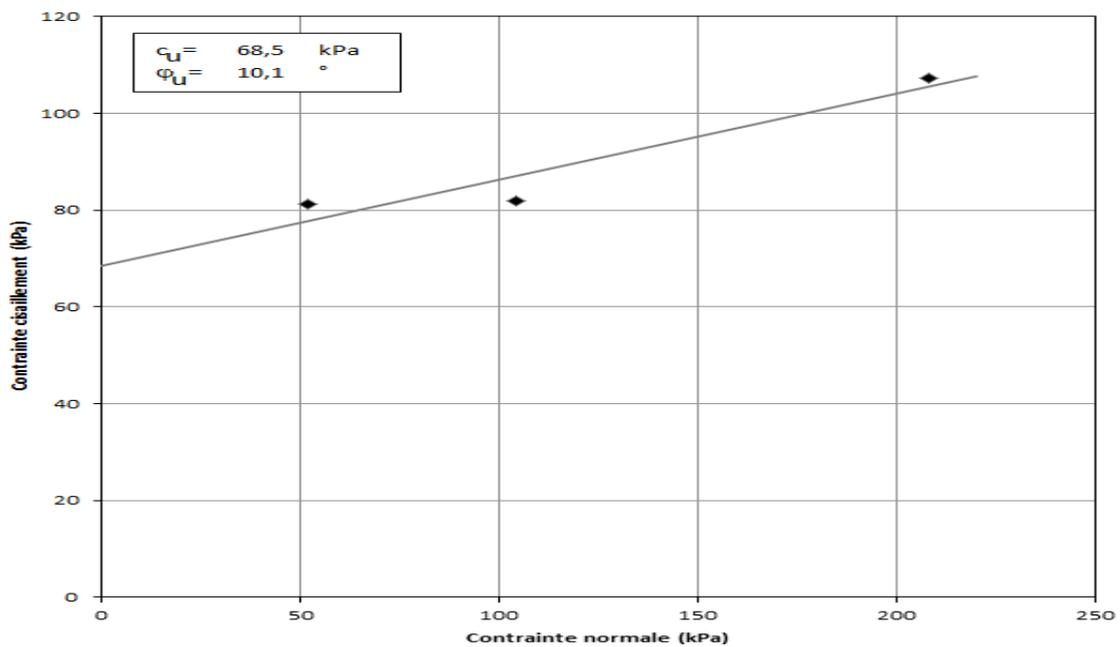
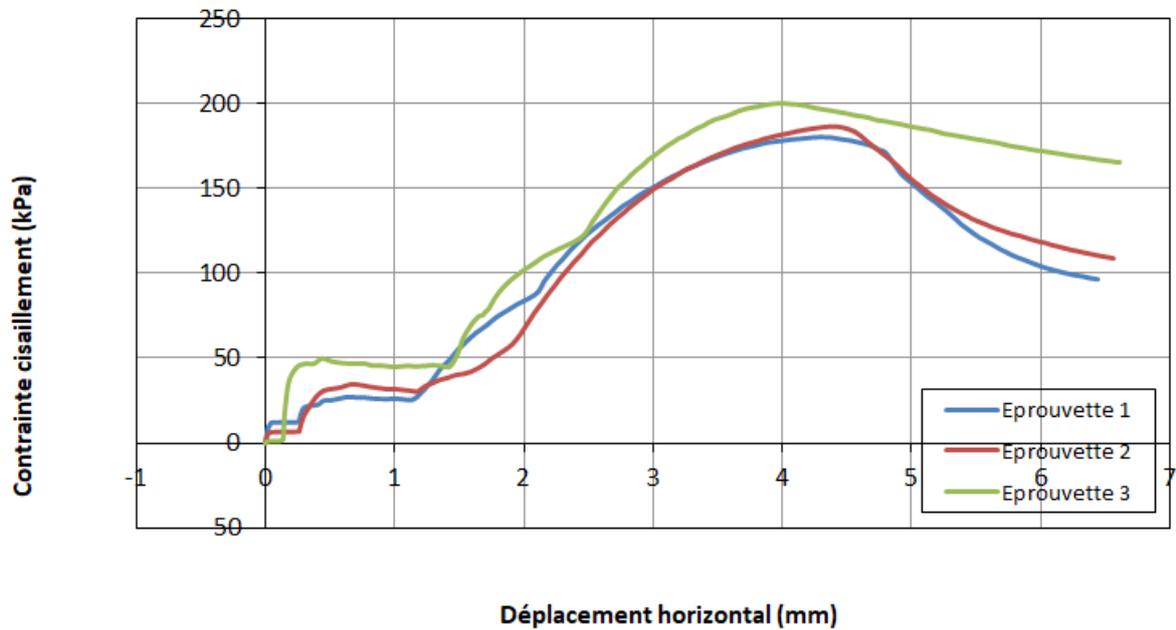
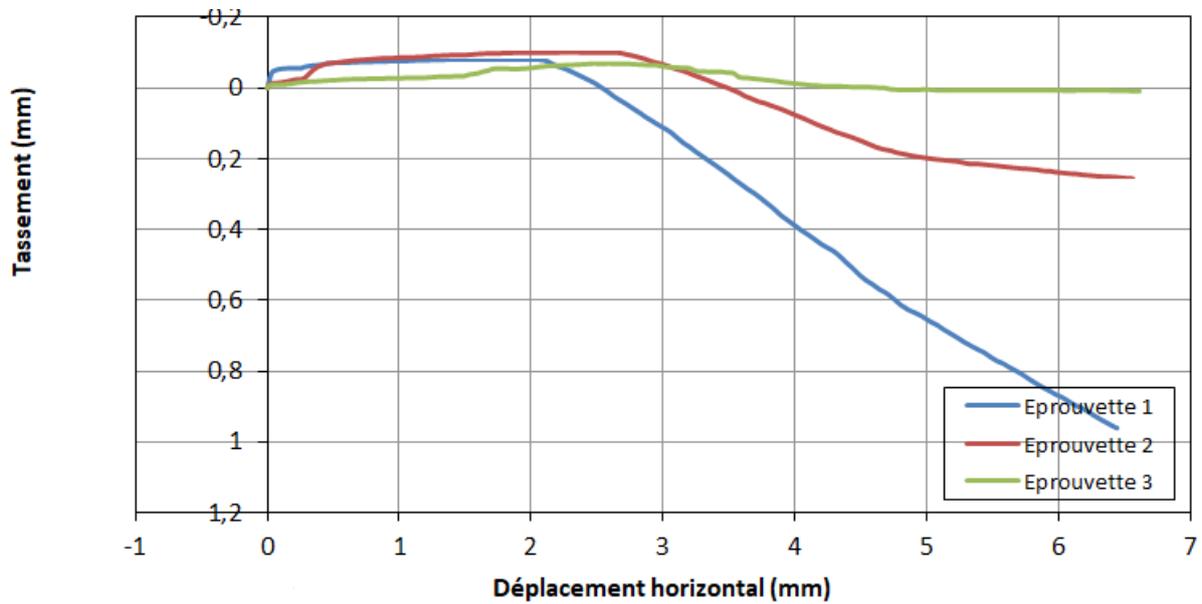


Figure.IV.18: Courbe intrinsèque relative à l'argile naturelle + 10% verre



(a)



(b)

Figure.IV.19: Résultats des essais de cisaillement (UU) réalisés sur les échantillons de l'argile +20% de verre : (a) contraintes de cisaillement (b) déplacement horizontal

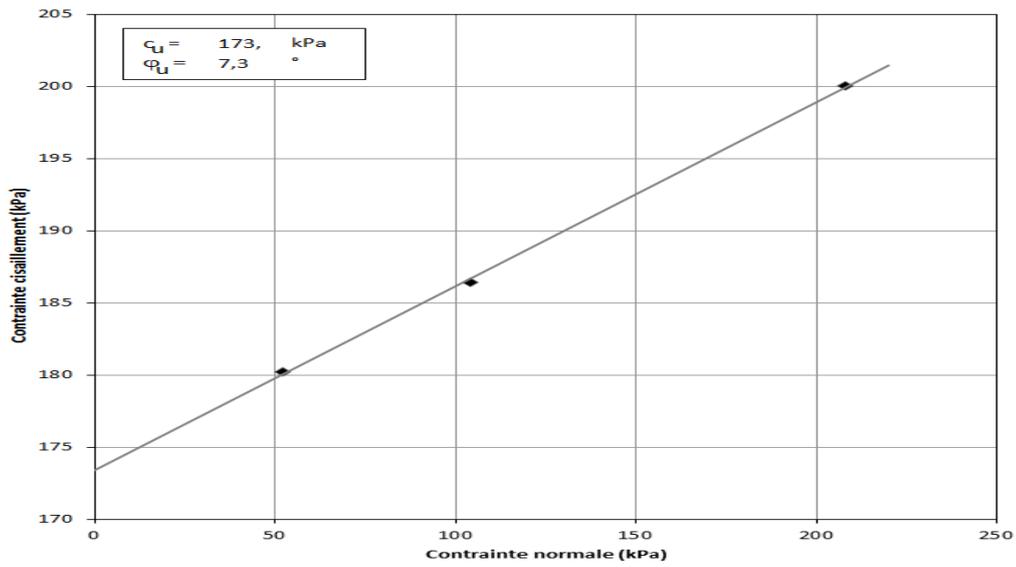
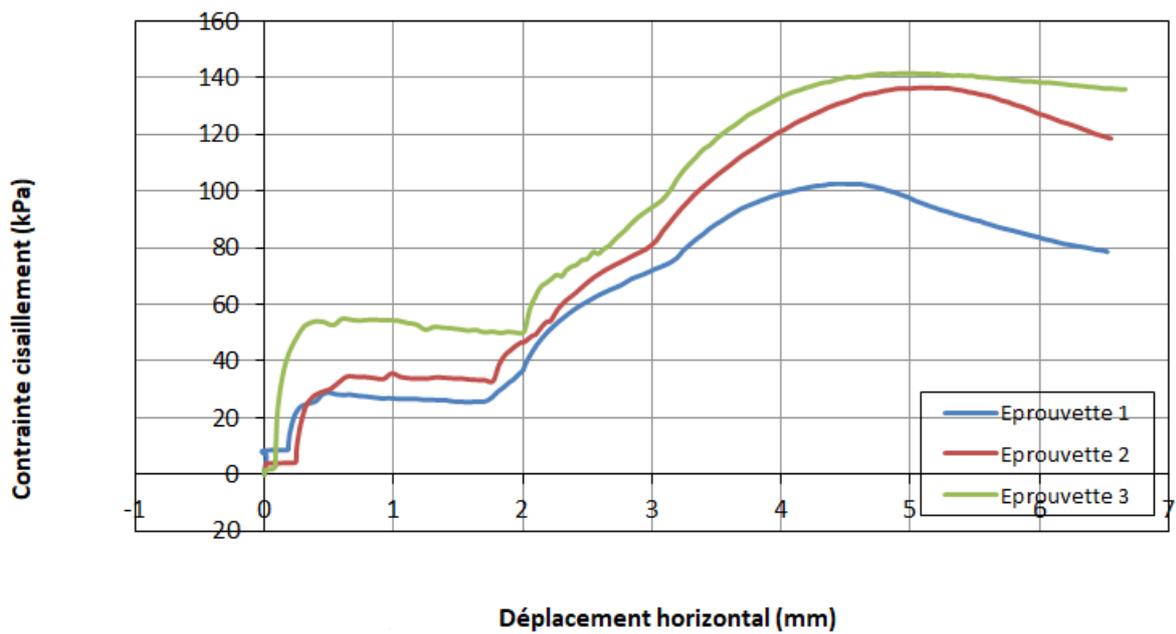


Figure.IV.20: Courbe intrinsèque relative à l'argile naturelle + 20% verre



(a)

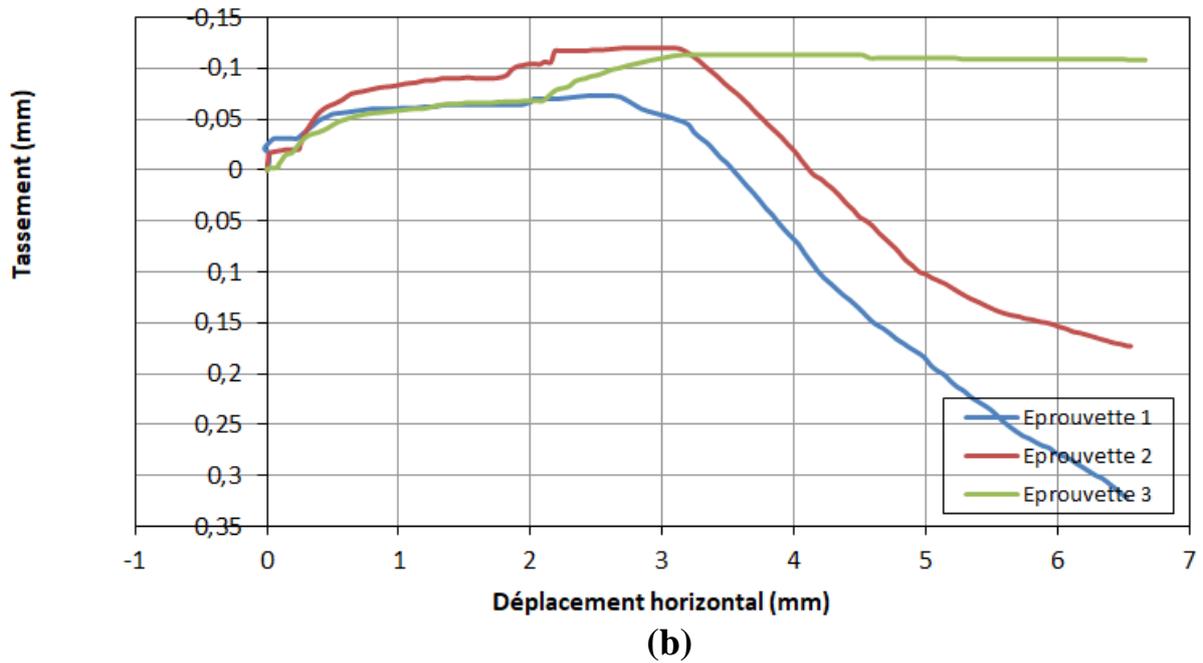


Figure IV.21 : Résultats des essais de cisaillement (UU) réalisés sur les éprouvettes de l'argile +30% de verre : (a) contraintes de cisaillement (b) déplacement horizontal

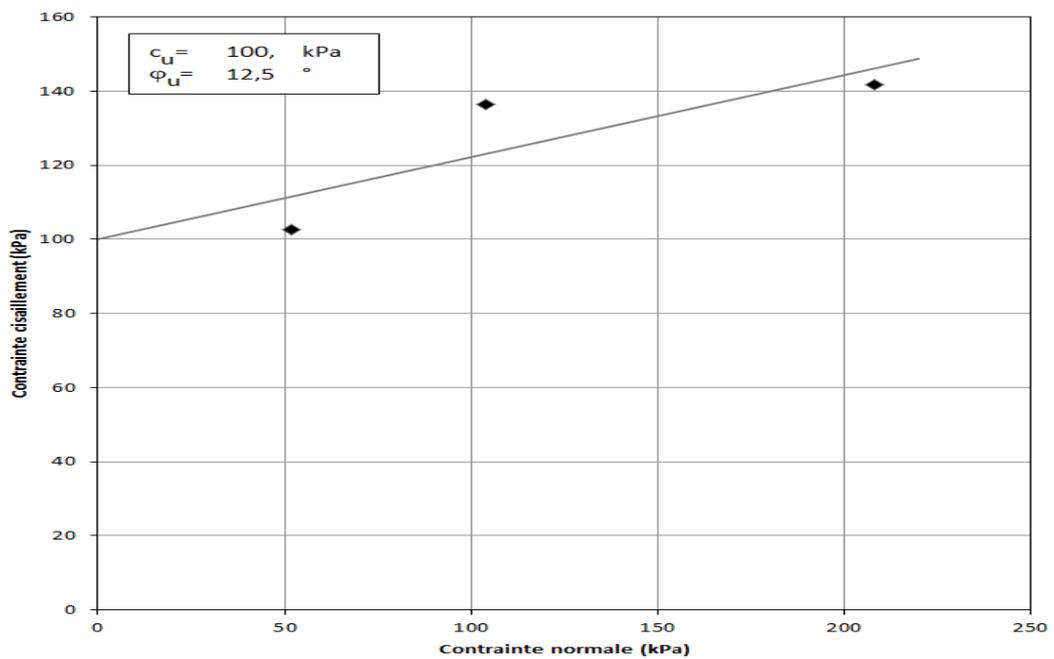


Figure.IV.22: Courbe intrinsèque relative à l'argile naturelle + 30% verre

- *Essais de cisaillement en conditions Consolidé-Drainé (CD)*

Tous les essais drainés ont été réalisés à une vitesse de l'ordre de 0,002 mm/min. Une telle valeur a été choisie après avoir calculée la vitesse maximale en fonction de t_{100} .

D'après la norme, la vitesse maximale de l'essai drainée est calculée avec la formule :

$V_{max} = 125/t_{100}$, $t_{100} = 82,81$ min (d'après la figure.IV.23 (Courbe de consolidation)).

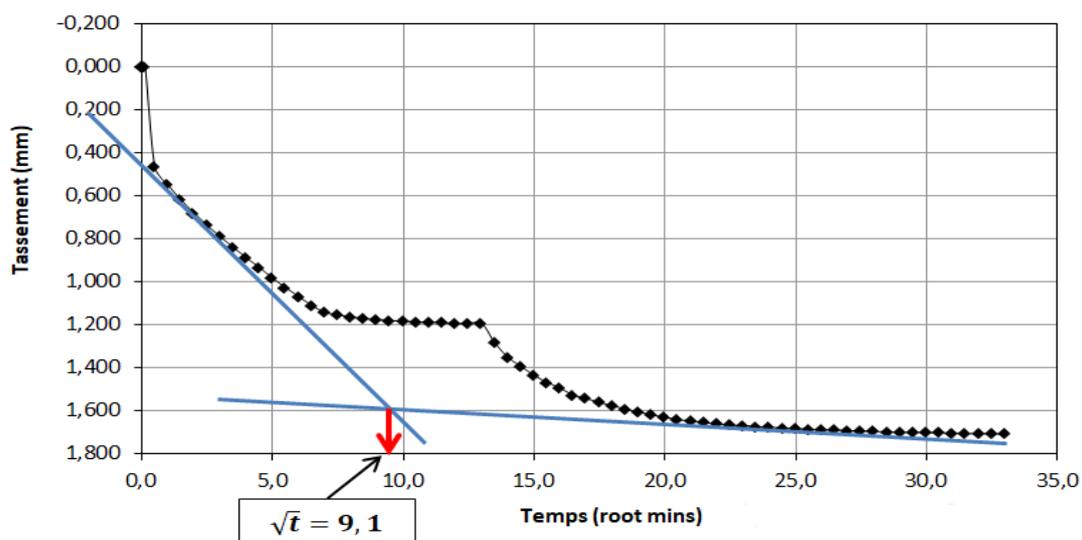
Donc, $V_{max} = 125/t_{100} = 0,0015$ mm/min.

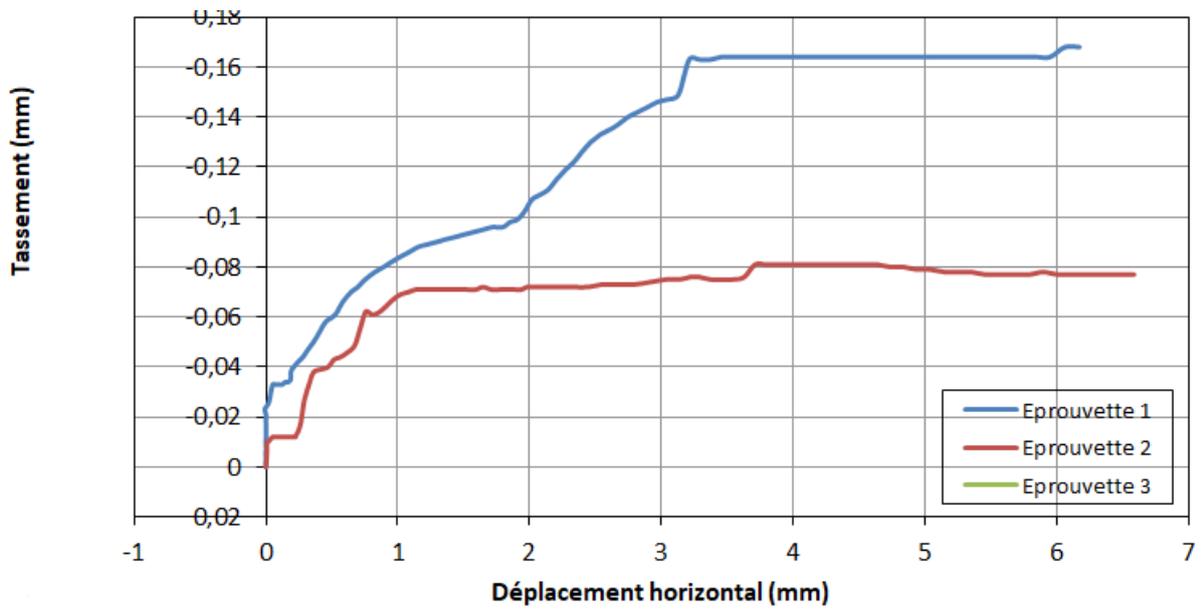
Pour des raisons pratiques liées à la durée des essais, on a adoptée une vitesse de l'ordre de 0,002 mm/min qui est proche de la vitesse maximale.

On présente sur les figurent qui suivent les différents résultats réalisés sur l'argile naturelle et les mélanges (argile-verre) à différents pourcentages (10%, 20% et 30%).

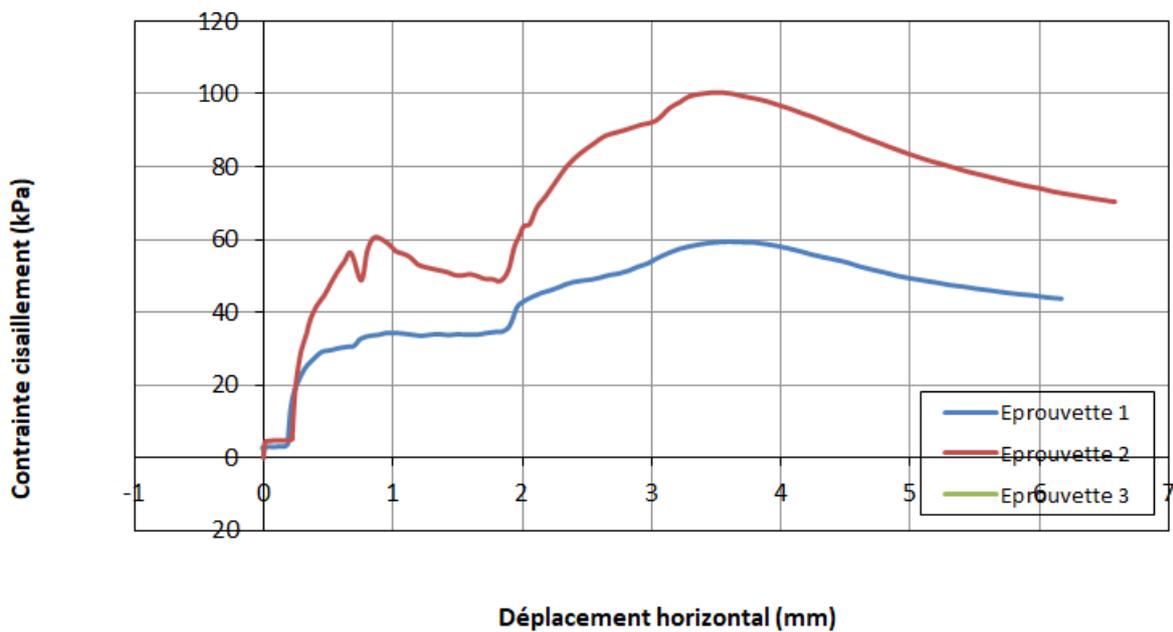
Il est à noter que par manque de temps, on a réalisé deux essais par mélanges, c'est-à-dire à deux contraintes normales seulement (100 et 200 kPa), car chaque essai dure 5 jours (24h pour la saturation, 24h pour la consolidation et 54 h pour le cisaillement). Malgré cela, on a tracé les courbes intrinsèques des différents mélanges.

Figure.IV.23: Courbe de consolidation





(a)



(b)

Figure.IV.24: Résultats des essais de cisaillement (CD) réalisés sur les échantillons de l'argile naturelle : (a) contraintes de cisaillement (b) déplacement vertical

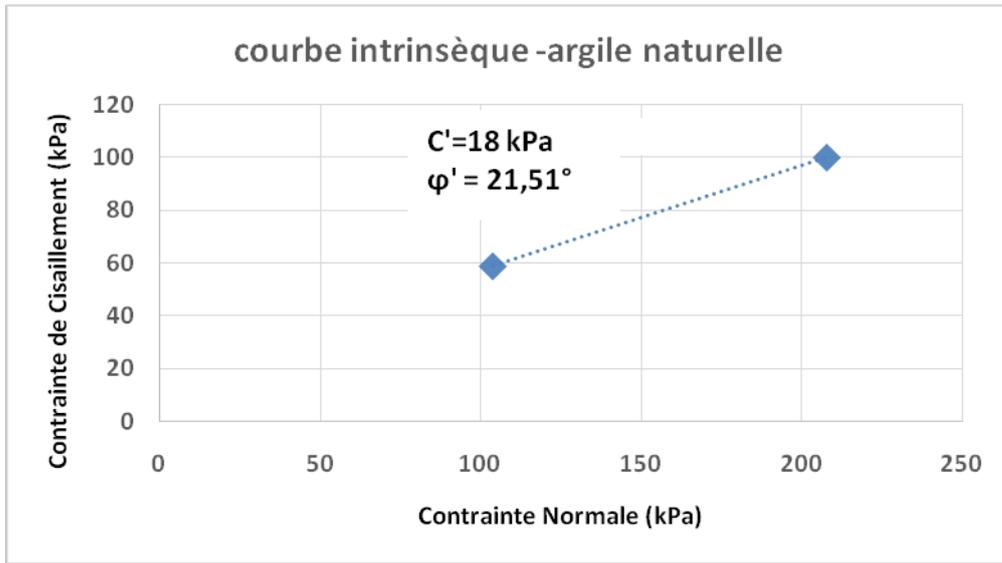
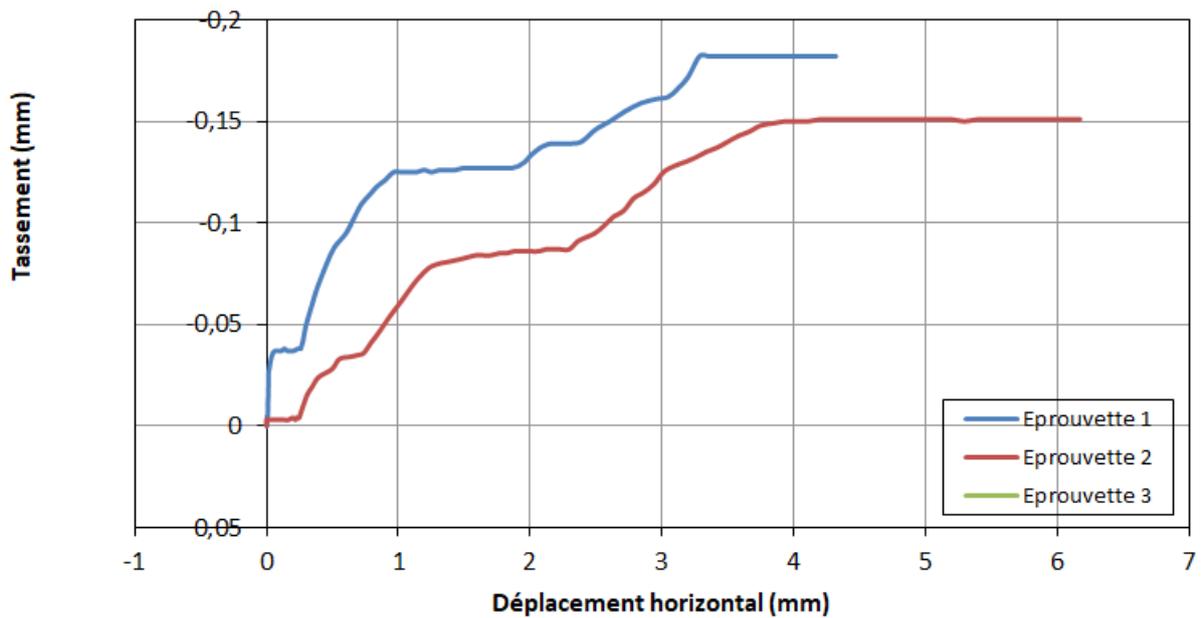
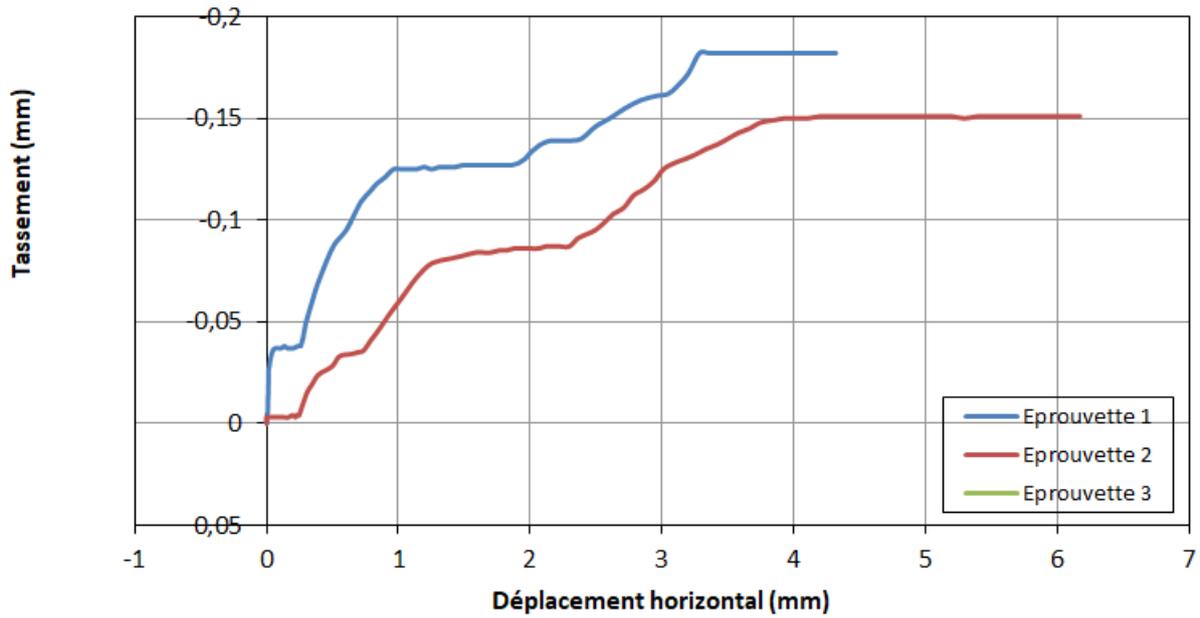


Figure.IV.25: Courbe intrinsèque relative à l'argile naturelle



(a)



(b)

Figure.IV.26: Résultats des essais de cisaillement (CD) réalisés sur les éprouvettes de l’argile naturelle +10% de verre : (a) contraintes de cisaillement (b) déplacement vertical

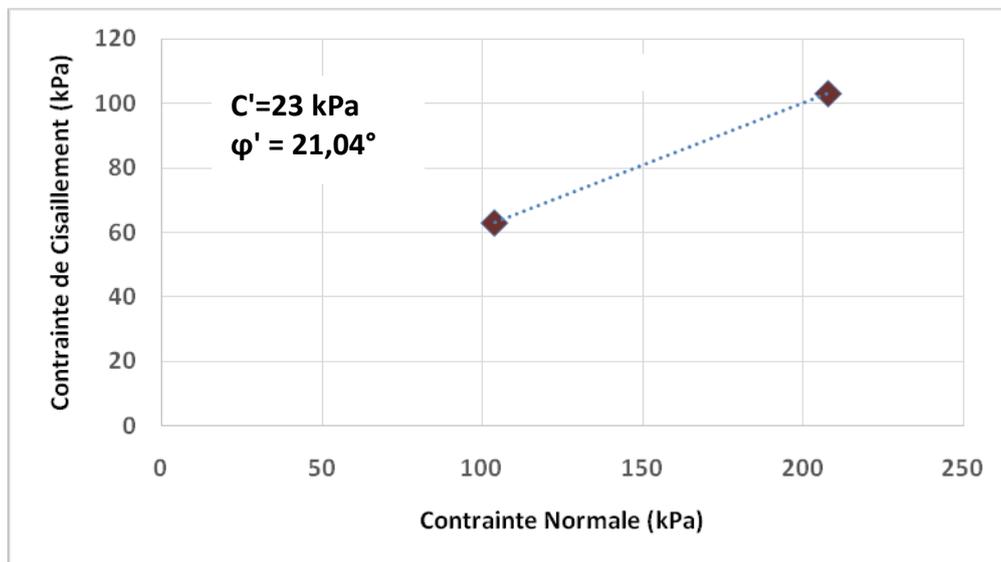
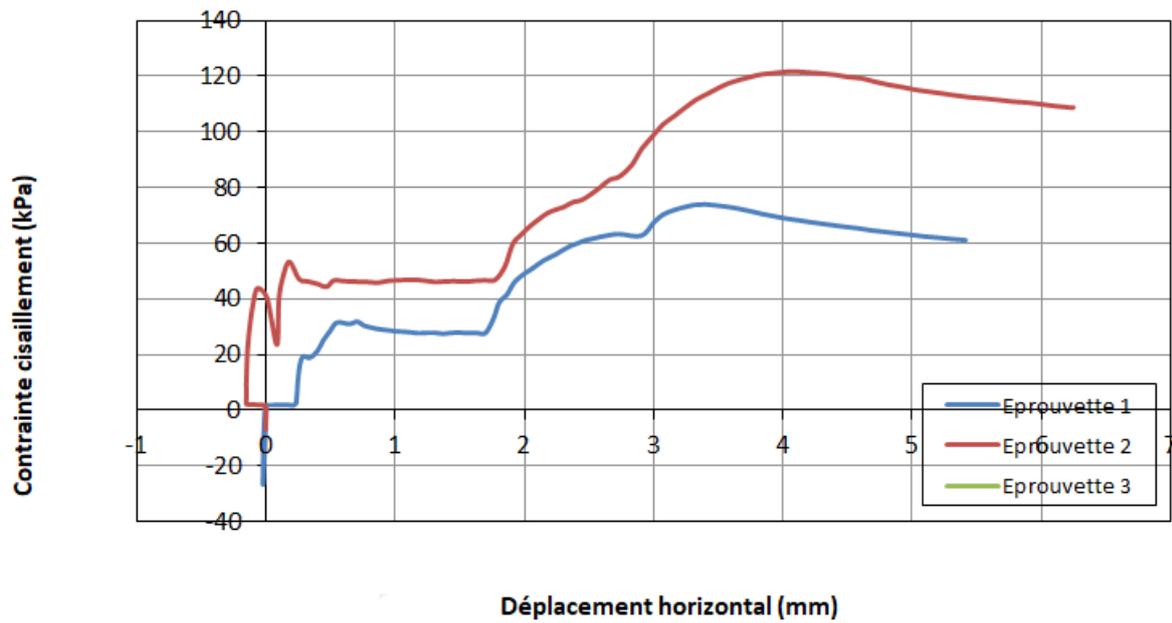
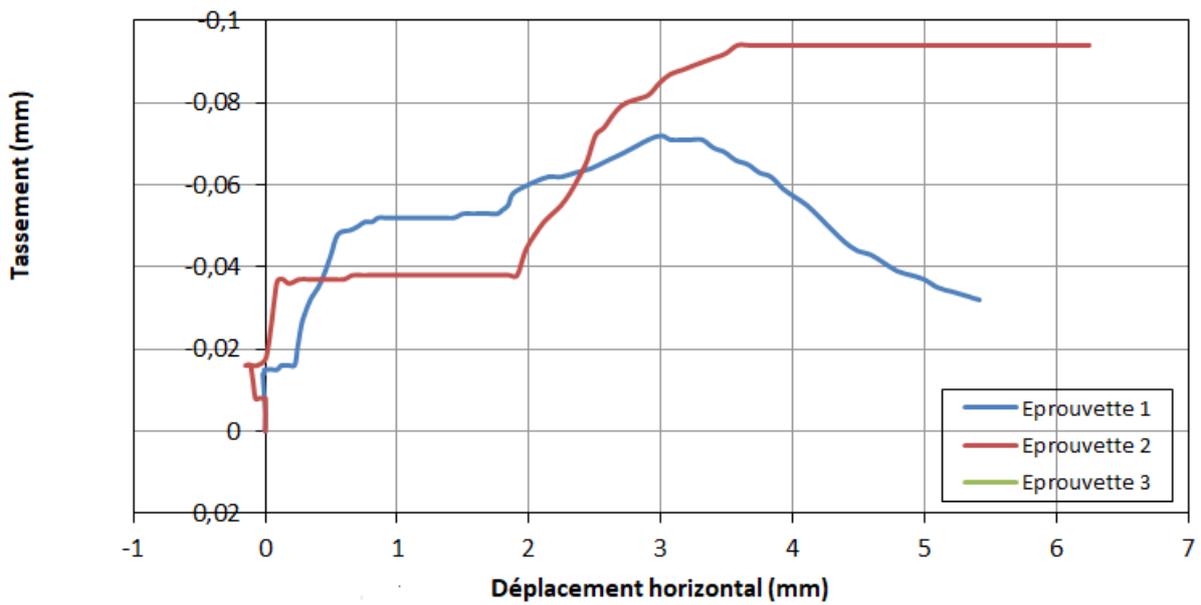


Figure.IV.27: Courbe intrinsèque relative au mélange d’argile naturelle et 10% de verre



(a)



(b)

Figure.IV.28: Résultats des essais de cisaillement (CD) réalisés sur les éprouvettes de l'argile naturelle +30% de verre : **(a)** contraintes de cisaillement **(b)** déplacement vertical

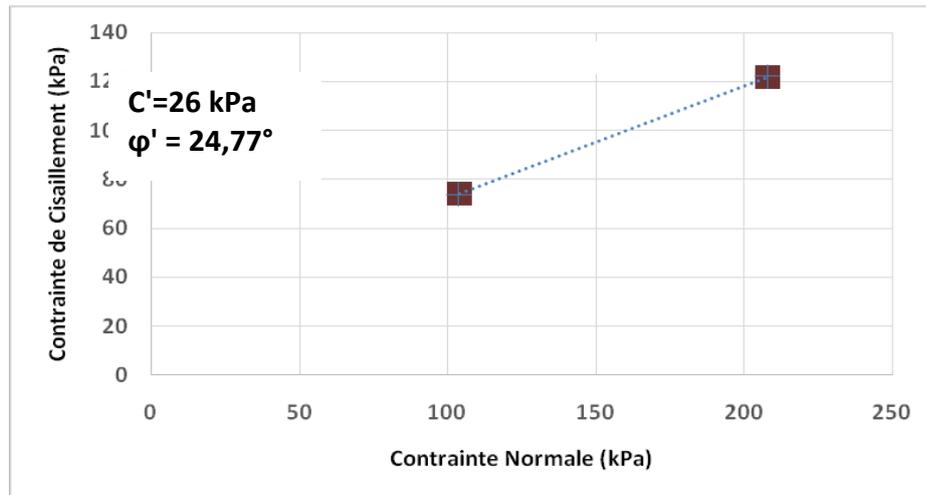


Figure.IV.29: Courbe intrinsèque relative au mélange d'argile naturelle et 30% de verre

IV.3.2.3. Essai Œdométriques XP P 94-090-1:

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

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

La charge est appliquée par paliers maintenus constants successivement croissants et décroissants suivant un programme défini. Les variations de hauteur de l'éprouvette sont mesurées pendant l'essai en fonction de la durée d'application de la charge.



Figure.IV.30: Dispositif de l'essai Œdométrique

Les étapes de l'essai sont présentées sur (figure.IV.30)



Figure IV.31 : les étapes de l'essai Cedométrique

(a) Pesée de la bague; (b) Carottage de l'échantillon avec la bague; (c) Arasage de l'éprouvette des deux côtés et mise en place de papier filtre sur chaque face; (d) Mise en place de l'éprouvette dans la cellule; (e) Mise en place du couvercle (f) Mise en place de la cellule sur le bâti de l'oedomètre; (g) Saturation de l'échantillon; (h) Réglage du comparateur de mesure de déplacement; (i) Application des charges sur l'éprouvette.

Expression des résultats:

Les résultats des essais Œdométriques pour les différents mélanges sont présentés comme suit:

- Argile naturelle:

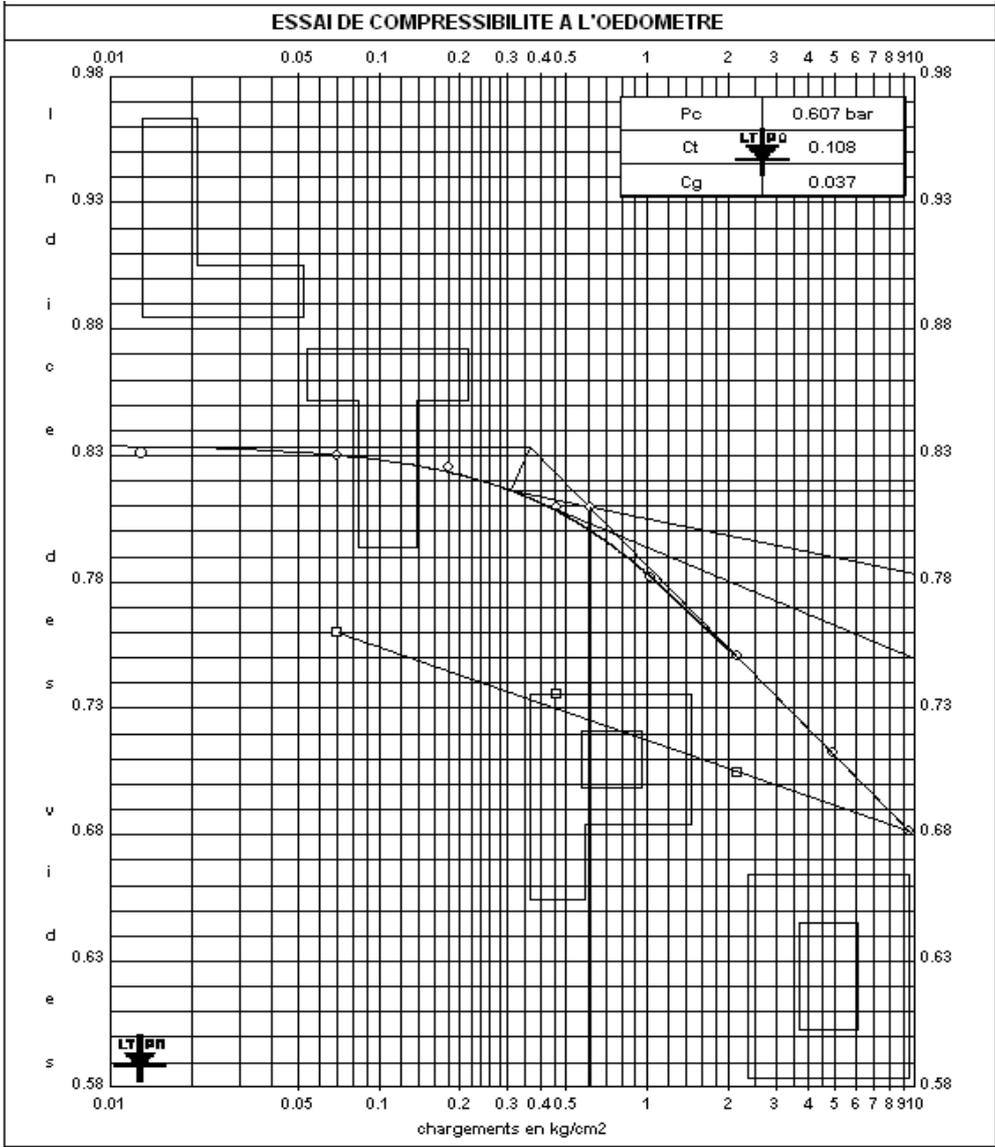


Figure.IV.32: Courbe de compressibilité de l'argile naturelle

- Le mélange d'argile avec 10% de verre:

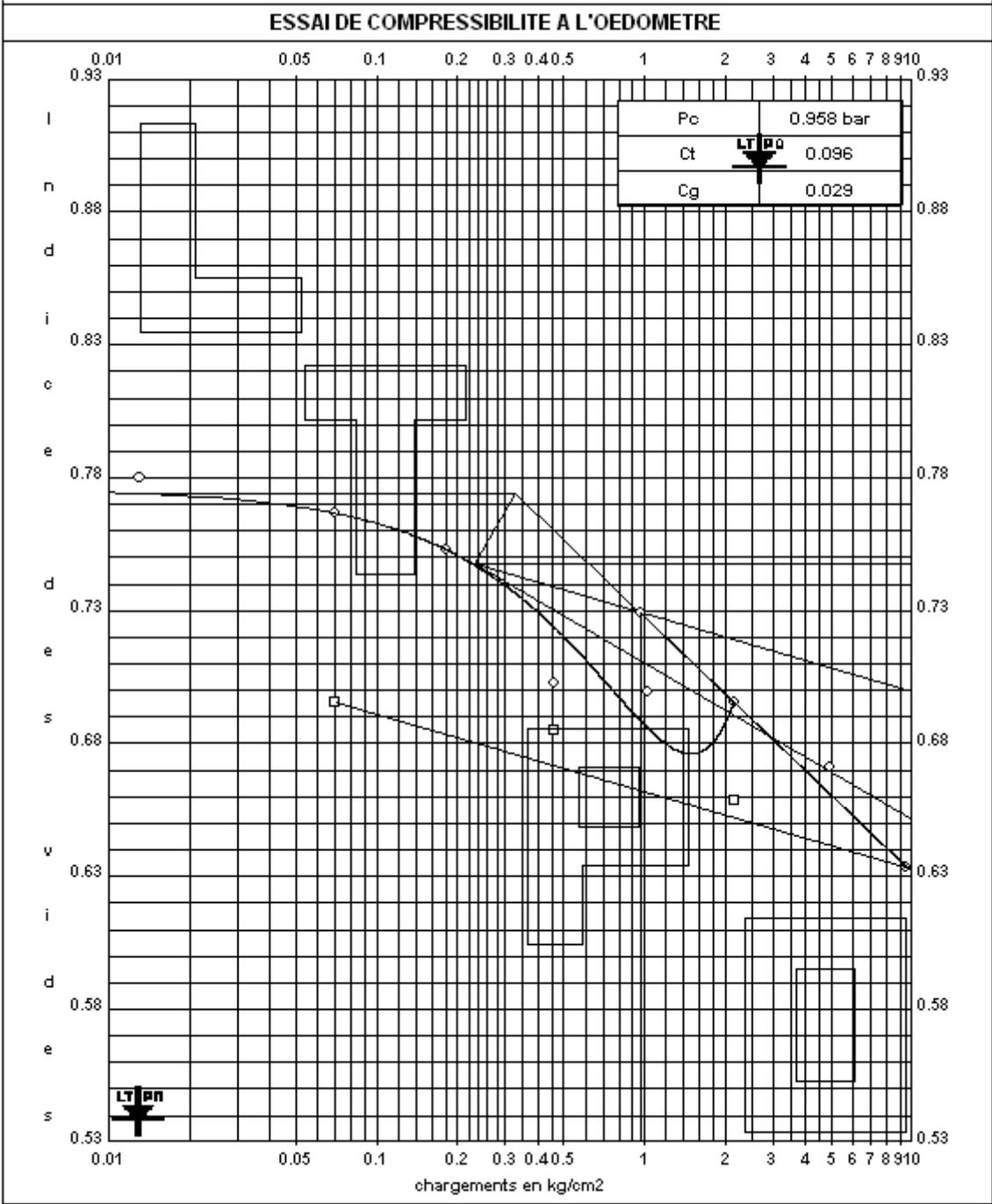


Figure.IV.33: Courbe de compressibilité de l'argile +10% de verre

- Le mélange d'argile avec 20% de verre:

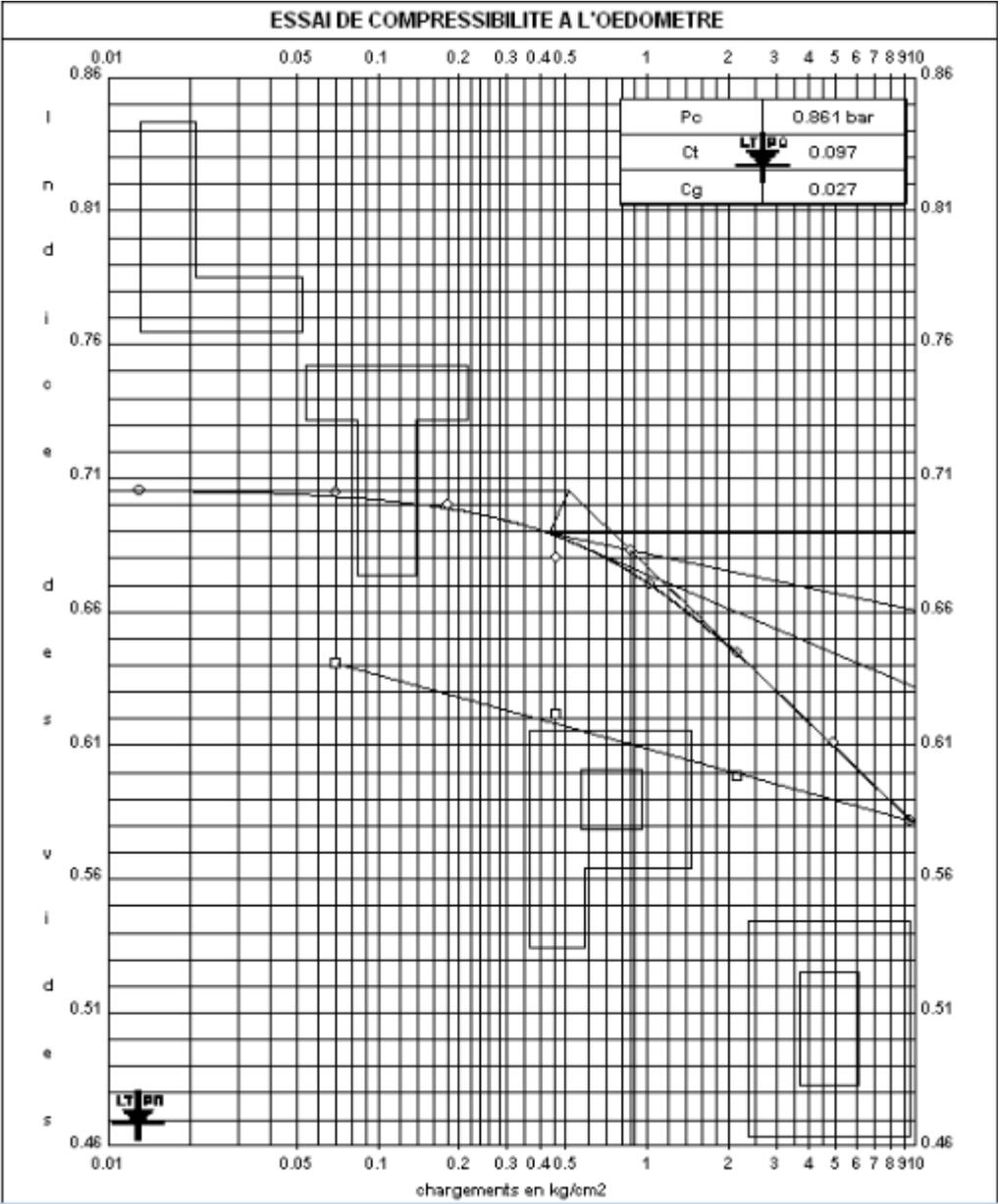


Figure.IV.34: Courbe de compressibilité d'argile avec 20% verre

- Le mélange d'argile avec 30% de verre:

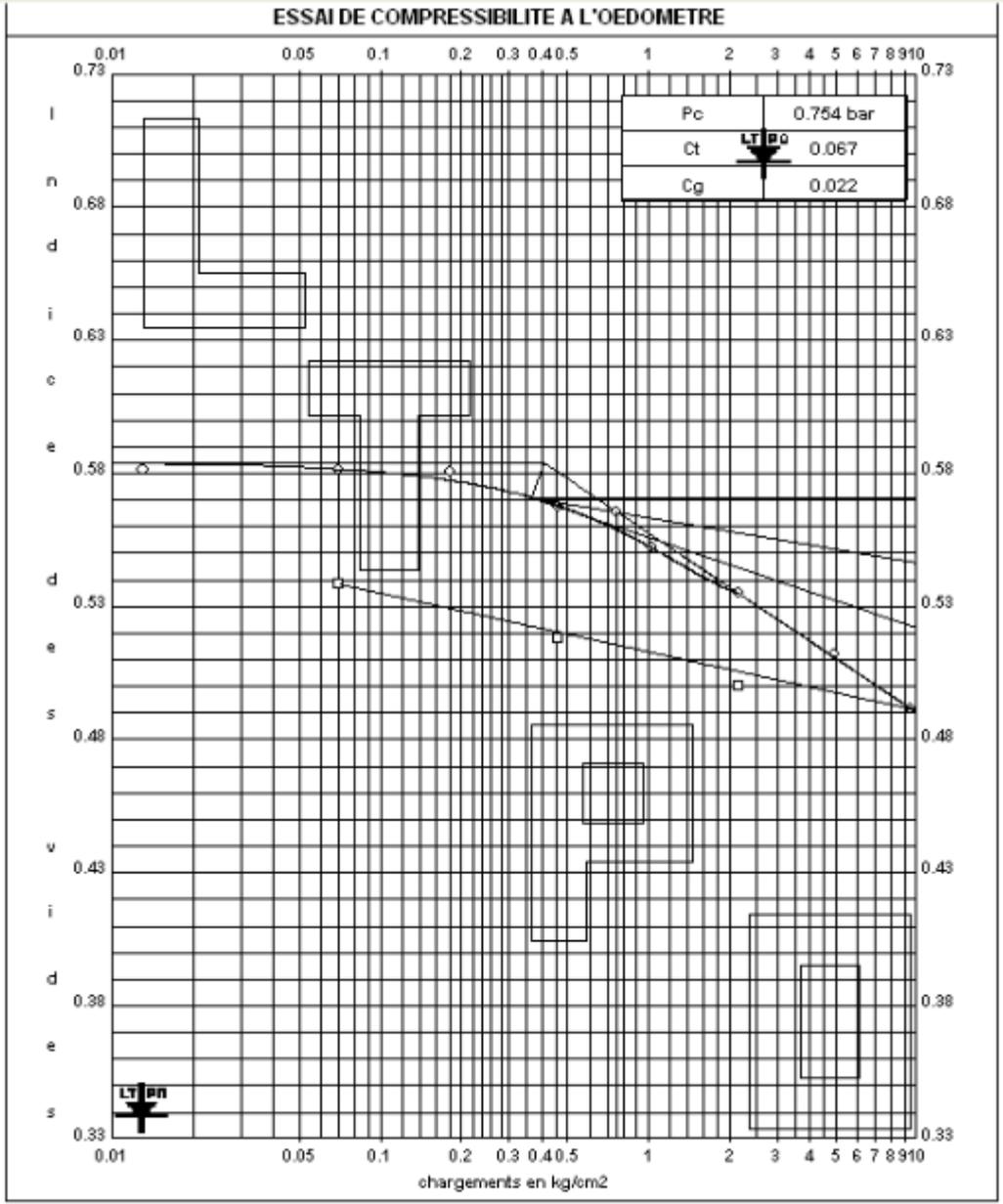


Figure.IV.35: Courbe de compressibilité d'argile avec 30% verre

IV.3.2.4. Essai de compression simple selon la norme européenne (EN 13286-41):

L'essai a pour but la détermination de la résistance à la compression des éprouvettes de matériel traité au liant hydraulique. Cette Norme européenne s'applique aux éprouvettes confectionnées en laboratoire ou obtenues à partir de carottes.

Une éprouvette est soumise à une compression jusqu'à la rupture. L'effort maximal supporté par l'éprouvette est enregistré et la résistance à la compression est calculée.

La résistance à compression, R_c , est donnée par l'équation :

$$R_c = F / A_c \dots (1)$$

Où :

R_c est la résistance à la compression de l'éprouvette de mélange traité aux liants hydrauliques, en newtons par millimètre carré (N/mm²) ;

F est l'effort maximal supporté par l'éprouvette de mélange traité aux liants hydrauliques, en newtons (N) ;

A_c est la surface de section transversale de l'éprouvette de mélange traité aux liants hydrauliques, en millimètres carrés (mm²).



Figure.IV.36: Presse utilisée pour l'essai de compression

Les étapes de l'essai sont présentées sur la figure ci-dessous:



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)



(g)



(h)



(i)

Figure.IV.37: les étapes de l'essai de compression simple

(a): Pesée de l'eau (b) : pesée de l'argile (c) : malaxage de l'argile avec l'eau ; (e) Préparation du moule en appliquant la vaseline sur ses parois (f) : compactage de l'échantillon (g) : Mise en place du piston supérieur ; (h) : Démoulage de l'échantillon (i) : Essai de compression

Expression des résultats:

Les résultats des essais de compression simple pour les différents âges des éprouvettes (10 ,14 et 21 jours) sont classés dans les tableaux si dessous.

Tableau.IV.13: Les résultats des essais de compression simple pour (10 jours)

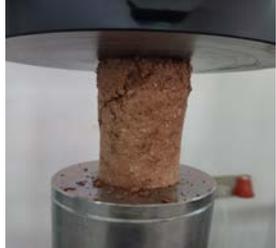
nature de l'échantillon	contrainte max (MPa)	Etat de l'éprouvette à la rupture
Argile naturelle	0.492	
Argile +10% de verre	1.122	
Argile +20% de verre	1.09	

Tableau IV.14: Les résultats des essais de compression simple pour (14 jours)

nature de l'échantillon	contrainte max (MPa)	Etat de l'éprouvette à la rupture
Argile naturelle	2.51	
Argile +10% de verre	1.42	
Argile + 20% de verre	1.777	
Argile + 30% de verre	2.80	

Tableau.IV.15: Les résultats des essais de compression simple pour (21 jours)

nature de l'échantillon	contrainte max (MPa)	Etat de l'éprouvette à la rupture
Argile naturelle	1.505	
Argile + 10% de verre	2.396	
Argile +20 % de verre	1.830	
Argile +30%	2.819	

La diffraction de rayon X (DRX):

La diffraction est une technique dont l'utilisation va de la simple identification des cristaux jusqu'à la détermination de leur structure atomique. Elle permet non seulement d'accéder à des paramètres structuraux (arrangement des atomes, paramètres de maille...) mais fournit également des informations sur la microstructure de l'échantillon (taille et forme des domaines cohérents). Pour étudier des systèmes cristallisés, les rayons X sont les plus employés car leur longueur d'onde est proche de 1 Å, ce qui correspond à l'ordre de grandeur des distances interatomiques dans la matière condensée (Amélie Juhin, 2008).

IV.4.Conclusion:

Dans ce chapitre, nous avons présenté les résultats d'essais d'identification de l'argile utilisée, de portance (Proctor) et des essais mécaniques (oedomètre et cisaillement). Il a été question de décrire d'une façon brève les différentes étapes des essais réalisés selon les normes en vigueur. Nous allons présenter dans le chapitre suivant l'analyse et l'interprétation des résultats trouvés

Chapitre V

Analyse et Interprétation des

Résultats

V.1.Introduction :

Ce chapitre est consacré à l'analyse et l'interprétation des résultats trouvés. Il s'agit, en fait, d'analyser l'influence de l'ajout du verre recyclé à différentes proportions sur le comportement des argiles gonflantes. A ce titre, on examinera, en particulier, les résultats des essais oedométriques et les essais de cisaillement à la boîte de Casagrande.

V.2.Essais Oedométriques :

On présente sur la figure V.1., les résultats des essais oedométriques réalisés sur les différents mélanges d'argile et de verre broyé à différents pourcentages.

On remarque les courbes de compressibilité sont classés en fonction du pourcentage du verre ajouté à l'argile (0%, 10%, 20%, 30%).

On peut remarquer déjà que l'indice des vides initial est d'autant plus faible que le pourcentage du verre est plus important. Cela est en concordance avec les résultats des essais Proctor dans lesquels on a trouvé que la densité sèche maximale augmente avec l'augmentation du pourcentage du verre ajouté.

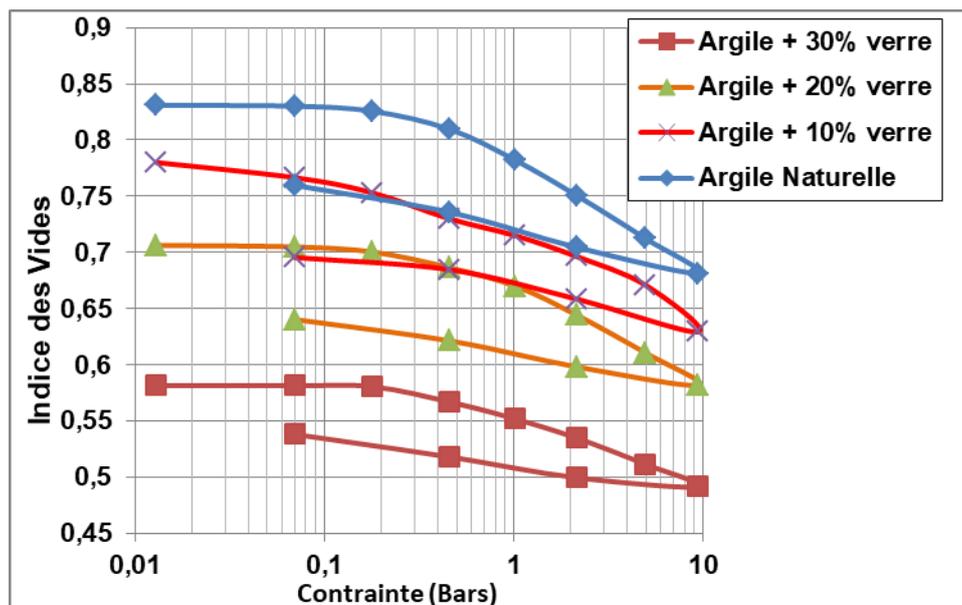


Figure V.1 : Courbes de compressibilité des différents échantillons

Examinons maintenant l'évolution des indices de gonflement et de compression.

D'après la figure V.2, on remarque que l'indice de gonflement diminue en augmentant l'ajout du verre broyé, cela est expliqué par le fait que les particules de verre mélangées à celles des argiles constituent une nouvelle structure qui amortie le gonflement des argiles.

De même pour l'indice de compression (Figure V.3) qui traduit la compressibilité du sol. C'est-à-dire l'ajout du verre broyé rend l'argile moins compressible du fait que l'indice des vides devient plus faible (matériau plus dense). L'indice est pratiquement le même pour les deux mélanges à 10% et à 20% de verre. Peut-être que l'indice de compression est surévalué, puisqu'il y avait un creux dans la courbe de compressibilité (Voir figure IV.33 du chapitre IV).

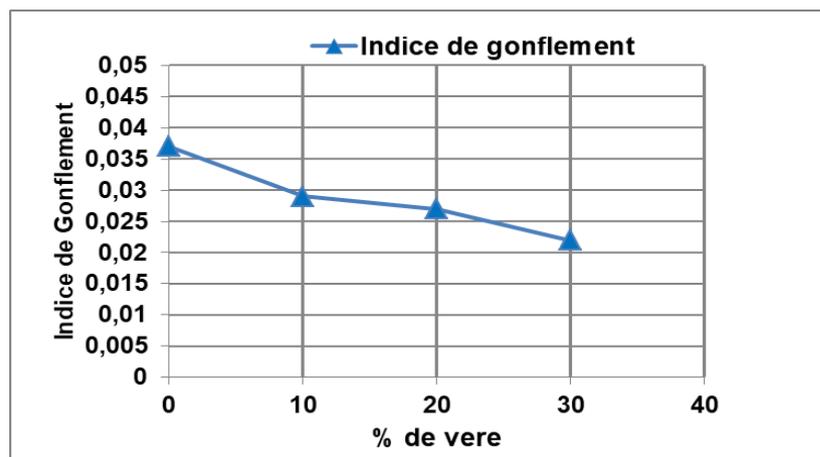


Figure V.2 : Variation de l'indice de gonflement en fonction du dosage en verre

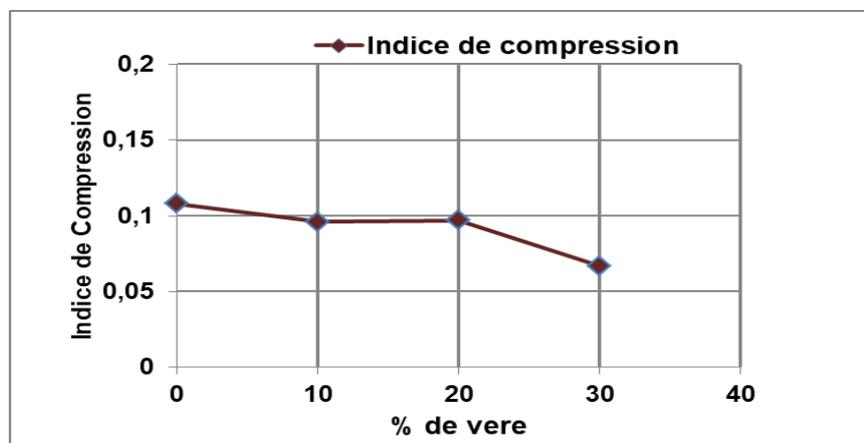


Figure V.3: Variation de l'indice de compression en fonction du dosage en verre

V.3. Essais de cisaillement direct:

V.3.1. Essais non consolidés non drainés (UU) :

D'après la figure V.4, on remarque que la cohésion non drainée (C_u) varie en fonction du pourcentage du verre ajouté. Le maximum de la cohésion a été obtenu pour un dosage en verre de l'ordre de 20%, une telle valeur est très élevée pour laquelle on ne trouve pas d'explication. L'augmentation de la cohésion non drainée pour les mélanges contenant du verre broyé est expliquée par le fait que les particules fines de verre ajoutées engendrent une cohésion supplémentaire par rapport au matériau naturel.

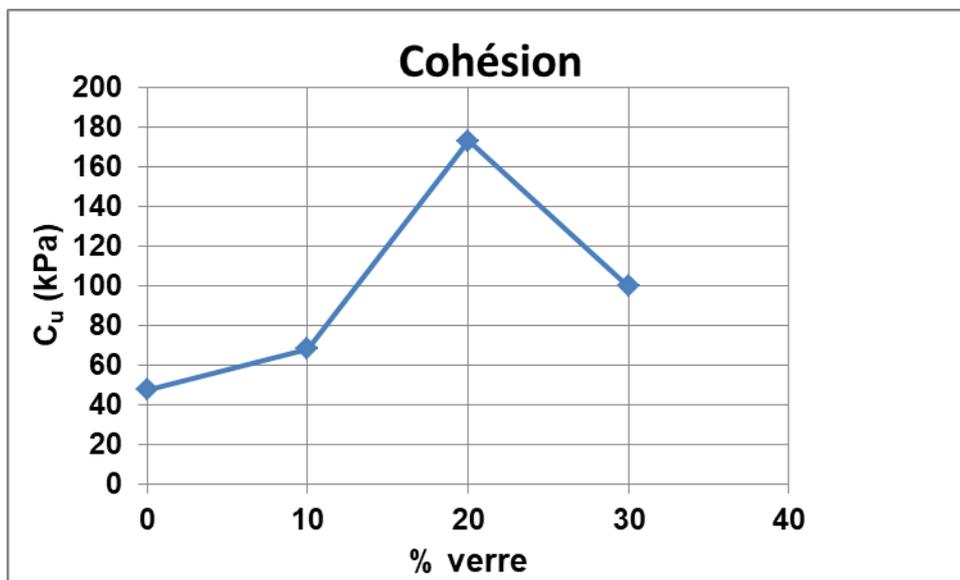


Figure V.4: Variation de la cohésion C_u en fonction du dosage en verre

V.3.2. Essais consolidés drainés (CD) :

Le comportement du sol à long terme est décrit par les paramètres c' qui représente la cohésion effective ou drainée et l'angle de frottement effectif ϕ' .

On remarque d'après la figure V.5 que la cohésion effective en condition drainée augmente en fonction du dosage en verre broyé. Cela veut dire que l'ajout de particules de verre à l'argile va augmenter la cohésion du mélange. La cohésion effective est due à une adhésion entre les grains provoquée par la préconsolidation.

Pour l'angle de frottement effectif, on peut remarquer que ce paramètre diminue un petit peu pour le dosage de 10%, mais il augmente sensiblement pour le dosage de 30%. Cela veut dire qu'une bonne quantité de verre broyé donne une nouvelle structure pseudo-granulaire au mélange.

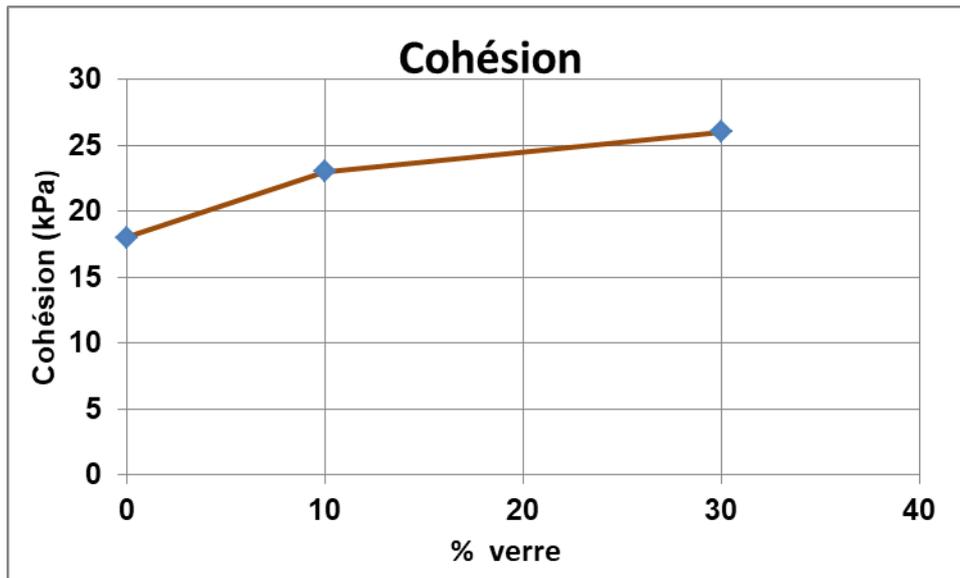


Figure V.5: Variation de la cohésion en fonction du dosage en verre

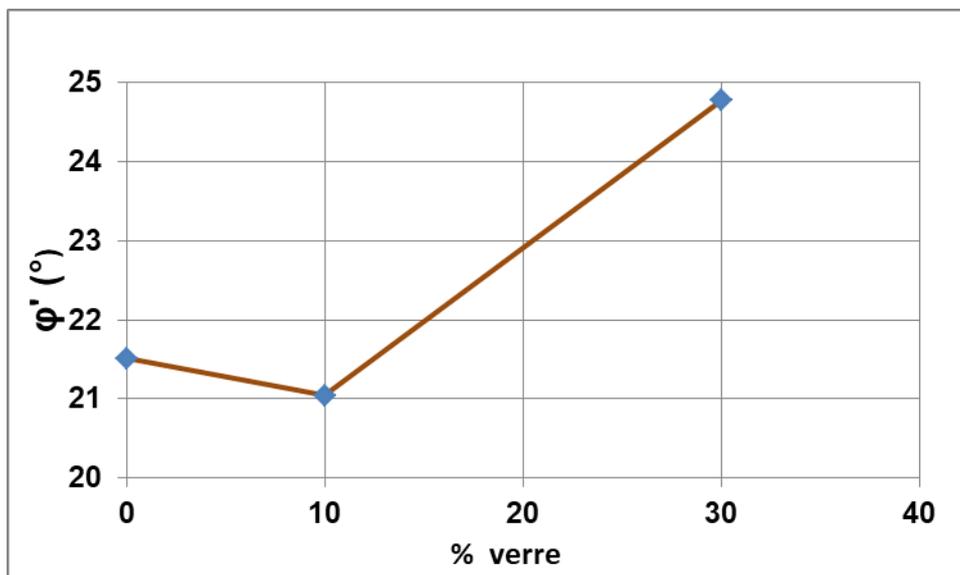


Figure V.6: Variation de l'angle de frottement en fonction du dosage en verre

V.4. Analyse DRX :

L'analyse DRX effectuée sur l'argile révèle la composition minéralogique suivante (Figure V.7) :

Quartz : grande quantité (majoritaire)

Kaolinite : minéral argileux de type 1/1

Illite : minéral argileux de type 2/1

Smectite : minéral argileux de type 2/1

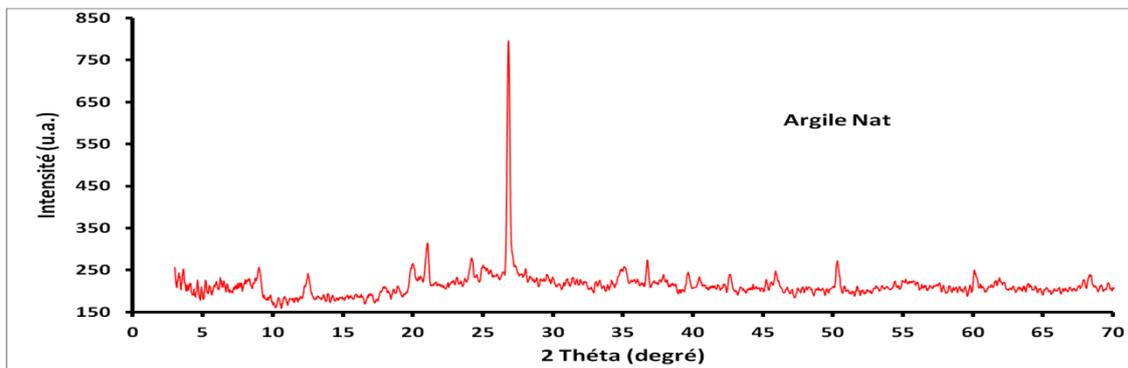


Figure V.7 : Spectre de réponse obtenu par DRX de l'argile naturelle

On représente sur la figure V.8 les résultats de l'analyse DRX réalisés sur les différents mélanges.

On remarque que l'ajout du verre diminue la cristallinité de l'argile avec l'augmentation du taux du verre ajouté. La diminution de la cristallinité est traduite par la diminution de l'intensité des pics des différents minéraux constituant l'argile brute, notamment celui du quartz (le pic le plus intense).

On peut noter qu'il y a une superposition parfaite des différents spectres de réponses, ce qui traduit une bonne homogénéisation des mélanges et bonne adhérence entre les particules de verre et celles de l'argile.

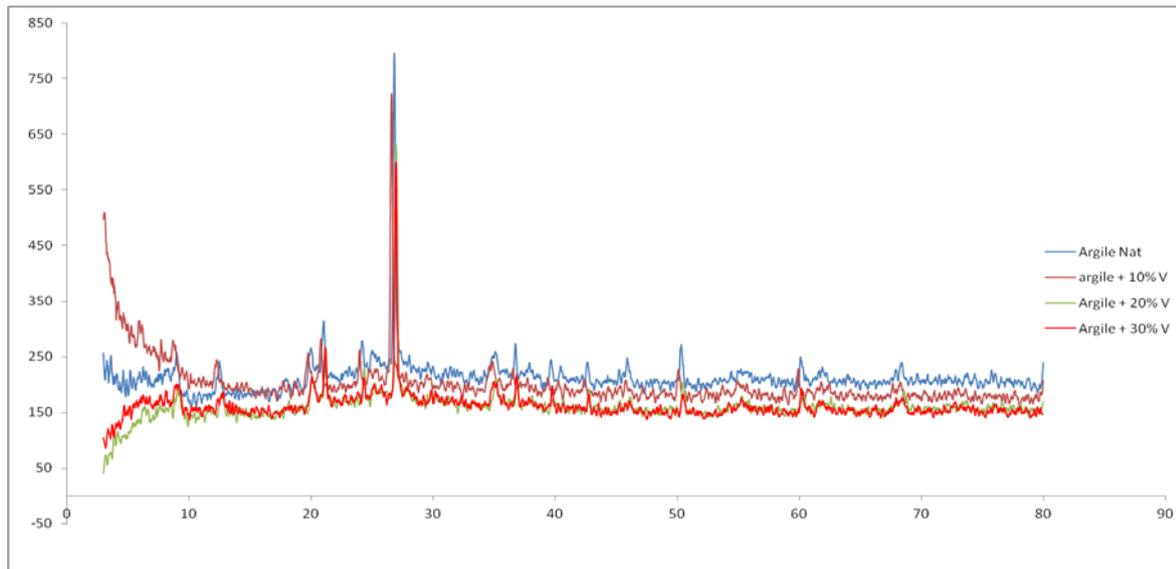


Figure V.8 : Spectre de réponse DRX des différents mélanges

V.5. Conclusion :

L'analyse des différents résultats met en évidence l'influence de l'ajout de verre broyé sur le comportement mécanique de l'argile en termes de : compressibilité, tassement et caractéristiques intrinsèques de l'argile.

Les résultats des essais de compression simple n'ont pas été analysés puisque on a réalisé une seule éprouvette par mélange et par âge, d'une part et vu la dispersion des résultats d'autre part.

*Conclusions générales et
Perspectives*

Conclusions générales et Perspectives

Notre travail consistait à valoriser les déchets de verre dans le domaine des travaux routiers, en les utilisant pour la stabilisation des argiles gonflantes avant de les mettre en remblais. Une telle solution permet de réutiliser les déblais argileux en remblais, d'une part et de réduire les matériaux sélectionnés, considérés comme ressources non renouvelables, afin de contribuer au développement durable, d'autre part.

Après une revue bibliographique sur l'état de l'art sur le recyclage des déchets de verre et le comportement des argiles, on a procédé à la réalisation des essais d'identification, de portance (Proctor) et mécaniques (oedométriques et de cisaillement).

La stabilisation des argiles a été effectuée par ajout de verre broyé (particules inférieures à $\mu 63$) à différents pourcentage (10%, 20% et 30%).

Concernant les essais de portance, on a trouvé que l'ajout du verre broyé augmente, d'une façon significative, la densité sèche du mélange. Cela est d'autant plus que le dosage du déchet de verre est important, ce qui traduit une bonne compactibilité des mélanges Argiles-Verre broyé

L'étude de comportement des mélanges à court terme et à long terme, a été examinée à travers les essais de cisaillement à la boîte en conditions UU (Non consolidé Non drainé) et les essais CD (en conditions consolidé- Drainé). Il a été trouvé que la cohésion non drainée augmente avec l'ajout du verre broyé. De même pour les caractéristiques intrinsèques des mélanges, en terme de cohésion angle de frottement effectifs).

Le mécanisme de compressibilité a été étudié à travers l'essai oedométrique et pour lesquels on a trouvé que les indices de compression et de gonflement diminuent en augmentant la quantité du verre ajouté.

En fonction de ce qui précède, on peut conclure que l'ajout du verre broyé à l'argile améliore sa consistance et son comportement, ce qui permet de l'utiliser en remblais routiers.

En plus, il nous paraît intéressant de pousser l'étude expérimentale pour examiner les aspects suivants :

Conclusions générales et perspectives

- Essais de compression simple à réaliser sur des éprouvettes fabriquées) base d'argile et de verre, à différents pourcentages et à différents âges (effet du temps de cure).
- Compléter les essais de cisaillement de type CD.
- Etudier l'effet de taille des particules de verre recyclé

Références bibliographie

Références bibliographiques

ACHOUR Nouria, Recyclage des matériaux en Algérie, Mémoire de magister, Université d'Oran Es-senia, **2007**.

Ahmed Ait Aghzzaf, Argiles en tant que réservoirs d'inhibiteurs de corrosion métallique issus de ressources naturelles dans des peintures pour la protection des métaux, Thèse de Doctorat de l'université de Lorraine, Nancy en Chimie, **2014**

Ali Abakar, Caractéristiques Mécaniques et Thermiques de l'Argile Stabilisée par la Gomme Arabique et Renforcée par la Paille de Riz, thèse de doctorat de l'Université de Lorraine, **2018**

Amélie Juhin, Propriétés électroniques et structurales du chrome en impureté dans les cristaux. Approche expérimentale et théorique, THESE DE DOCTORAT DE L'UNIVERSITE PIERRE ET MARIE CURIE, **2008**

Amrous warda et belkada nabil, étude la filiere du recyclage du verre a l'unité alverdoranet proposition du piste d'amélioration our une gestion plus responsable et durable mémoire master, UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU, **2015**

Armines, Topologie des structures vis-à-vis du risque sécheresse-modélisation des interactions sol Rstructure, Rapport final Fondation MAIF ALEA ET RISQUE SECHERESSE de R Centre de Géosciences, **2009**

ARVOR Géotechnique, Essai de cisaillement rectangulaire à la boîte Cisaillement direct (NF P 94-071-1), **2011**

Brahim DJEMACI, La gestion des déchets municipaux en Algérie : Analyse prospective et éléments d'efficacité, thèse doctorat, UNIVERSITE DE ROUEN, **2012**

BOUABDALLAH Soufiane. CARACTERISATION-ENRICHISSEMENT DES GRES PAUVRES D'EL-AOUANA: CAS DE L'USINE DE VERRE (AFRICAVER) / JIJEL, thèse doctorat, UNIVERSITEBADJI MOKHTAR ANNABA

BOUCHETA Abbès, Absorption de composés organiques par la houille et la bentonite, Thèse de Doctorat d'université Djillalli Abes faculté de la science sidi bel abbes, **2017**

Daoud Ali, Mécanique des sols de Département de Géographie et Aménagement du Territoire Institut des Sciences de la Terre et de l'univers, **2020**

Références bibliographiques

DJERIDI Abdelmoumene, Élaboration de matériaux à base de verres à réseau mixte pour la vitrification des déchets nucléaires, Thèse de Doctorat, UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA-BOUMERDES, **2019**

Djoudi A. Krim NEDJAH A.RAOUF, Stabilisation des sols gonflants, Master en Géotechnique de Université SOUK, **2015**

GUEZOUL Ikram & BENDJAZIA Fatima Zohra Khadoudj, Stabilisation d'argile par ajout de verre recyclé avec un prétraitement à la chaux, Mémoire de master, Université IBN Khaldoun Tiaret, **2020**

HADJI Riheb, Mécanique des sols et des travaux de fondations, UNIVERSITE FERHAT ABBAS-SETIF 1, **2019**

HERNOT François, L'argile, son utilisation à l'officine, Thèse de doctorat en pharmacie, **2016**

Honoré TUYISHIME, Etude comparative des différentes techniques de stabilisation en géotechnique routière, mémoire de master en génie de l'eau et de l'environnement, **2015**

Hussein ALGALI, Caractérisation des Instabilités dans les Milieux Granulaires - Etude Expérimentale et Simulation, thèse de doctorat de L'UNIVERSITE PAUL VERLAINE-METZ, **2008**

Jonathan DECOTTIGNIES avec l'appui de **Bertrand BOHAIN, Paul DEFFONTAINE, Delphine GOURLET, Rémi LANTREIBECQ, Sylviane OBERLE** et **Marie RODRIGUEZ**, Cercle National du Recyclage LILLE, **2008**

KEDDAM ADIDI, Etude du comportement d'un mélange de (marne + verre) pour une valorisation dans la construction routière, UNIVERSITE MOULOUD MAMMARI DE TIZI-OUZOU, **2015**

KEHILA Youcef, Rapport sur la gestion des déchets solides en Algérie, publié par Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH, **2014**

Luc Sibille, Essai oedométrique et mesure de perméabilité du tp (IUT GCCD module MXG4), Licence. France. **2017**

Miriam CHLIGUI, Etude des propriétés optiques et mécaniques des verres binaires silicatés d'alcalins lourds, thèse doctorat, UNIVERSITÉ D'ORLÉANS, **2010**

M'RAIM Tarek, Amélioration de la portance des argiles par l'ajout de particules de verre récupéré, Mémoire de master, Université IBN Khaldoun Tiaret, **2019**

OUSLATI FATIMA, Effets des déchets des pneus sur les propriétés géotechnique d'une argile, mémoire de master de Faculté des sciences de l'ingénierie des départements de génie civil, **2019**

Tatiana MAISON, Analyse à l'échelle microscopique des phénomènes d'humectation et de dessiccation des argiles, thèse de doctorat d'école centrale des arts et manufactures, **2011**

Yassine BENTAHAR, Caractérisation physico-chimique des argiles marocaines : application à l'adsorption de l'arsenic et des colorants cationiques en solution aqueuse, Thèse de doctorat en science de l'université de Nice-Sophia Antipolis, **2016**

ZEGHICHI.LEILA, ZOUBIRI AMINA, Comportement du béton à base de la poudre de verre à hautes températures Effet de l'âge, mémoire master, **2016**

Normes utilisés

Norme française NF P 94-071-6, Essai de cisaillement rectangulaire à la boîte, **1994**

Norme française NFP 94-051, Détermination des limites d'Atterberg, **Mars 1993**

Norme française NFP 94-051, Analyse granulométrique, **Mars 1996**

Norme française NFP 94-068, Détermination de la valeur de bleu de méthylène d'un sol, **Octobre 1998**

Références bibliographiques

Norme Algériennes NA-2789, Détermination de la teneur en carbonate

Norme NA-16002-5042, Détermination de la teneur en sulfates

Norme NA255/1990, détermination de Poids spécifiques des gains solides

Norme NFP94-050-91, Détermination de la teneur en eau pondérale des sols

Norme (NA 5262, NF P 94-093), Essai Proctor normal

Norme XP P 94-090-1, Essai Edométriques

La norme européenne (EN 13286-41), Essai de compression simple

sites internet consultés

<https://www.golden-trade.com/cnt/gt/valorisation-du-verre-3916-50264-cat.html> consulte
le 23/04/2021

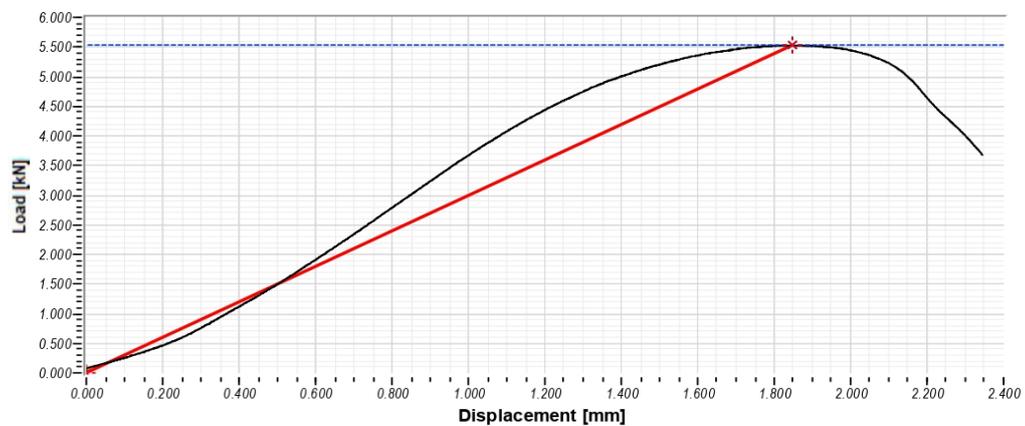
www.bio-ecoloblog.com consulté le 20/02/2021 16.30h

*Rapports d'essais de
Compression simple*



TEST CUSTOM

Certificate name		Certificate date	30/05/2021
Client			
Reference			
Test organization			
Testing apparatus			
Specimen ID	Argile Medrissa + 30%	Specimen number	3
Specimen description			
Type of binder	Verre	Type of aggregate	
Production site	Carriere de Medrissa	Production date	06/06/2021
Test type	Compression test	Sample type	d h
d [mm]	50.00	Equivalent area [mm ²]	1963.495
h [mm]	100.00	k1	1.00
		k2	1.00
Stability [kN]	5.535	Flow [mm]	1.85
		Tangent flow [mm]	1.85
		Rigidity [kN/mm]	2.992
Test speed [mm/min]	0.230		
Notes			
Load [kN]	6	Displacement [mm]	2
		Stress [GPa]	2.819



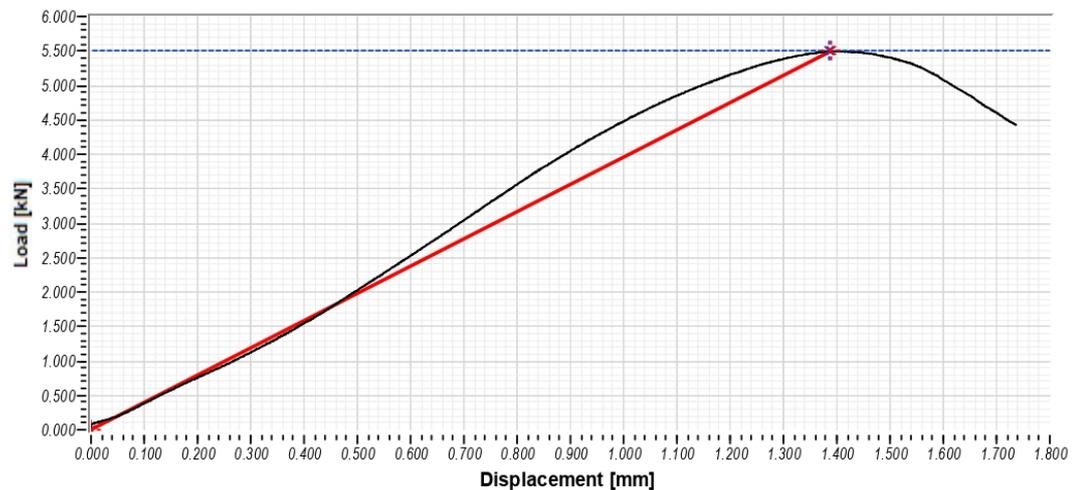
Operator

Hadj BEKKI



TEST CUSTOM

Certificate name		Certificate date	30/05/2021
Client			
Reference			
Test organization			
Testing apparatus			
Specimen ID	Argile Medrissa + 30%	Specimen number	2
Specimen description			
Type of binder	Verre	Type of aggregate	
Production site	Carriere de Medrissa	Production date	06/06/2021
Test type	Compression test	Sample type	d h
d [mm]	50.00	Equivalent area [mm ²]	1963.495
h [mm]	100.00	k1	1.00
		k2	1.00
Stability [kN]	5.494	Flow [mm]	1.39
		Tangent flow [mm]	1.39
Rigidity [kN/mm]			3.961
Test speed [mm/min]	0.230		
Notes			
Load [kN]	5	Displacement [mm]	1
		Stress [GPa]	2.798



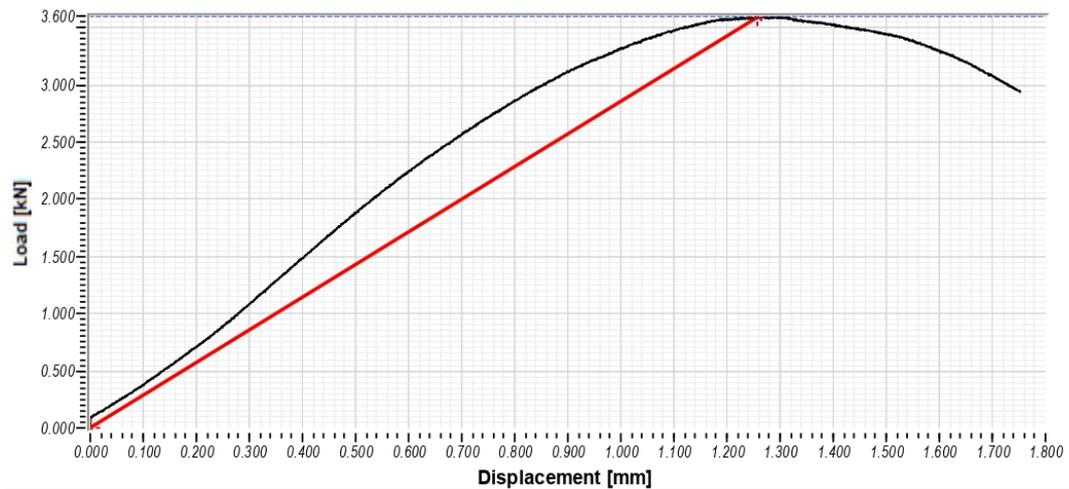
Operator

Hadj BEKKI



TEST CUSTOM

Certificate name		Certificate date	30/05/2021
Client			
Reference			
Test organization			
Testing apparatus			
Specimen ID	Argile Medrissa + 20%	Specimen number	2
Specimen description			
Type of binder	Verre	Type of aggregate	
Production site	Carriere de Medrissa	Production date	31/05/2021
Test type	Compression test	Sample type	d h
d [mm]	50.00	Equivalent area [mm ²]	1963.495
h [mm]	100.00	k1	1.00
		k2	1.00
Stability [kN]	3.594	Flow [mm]	1.26
		Tangent flow [mm]	1.26
Rigidity [kN/mm]			2.855
Test speed [mm/min]	0.230		
Notes			
Load [kN]	4	Displacement [mm]	1
		Stress [GPa]	1.830



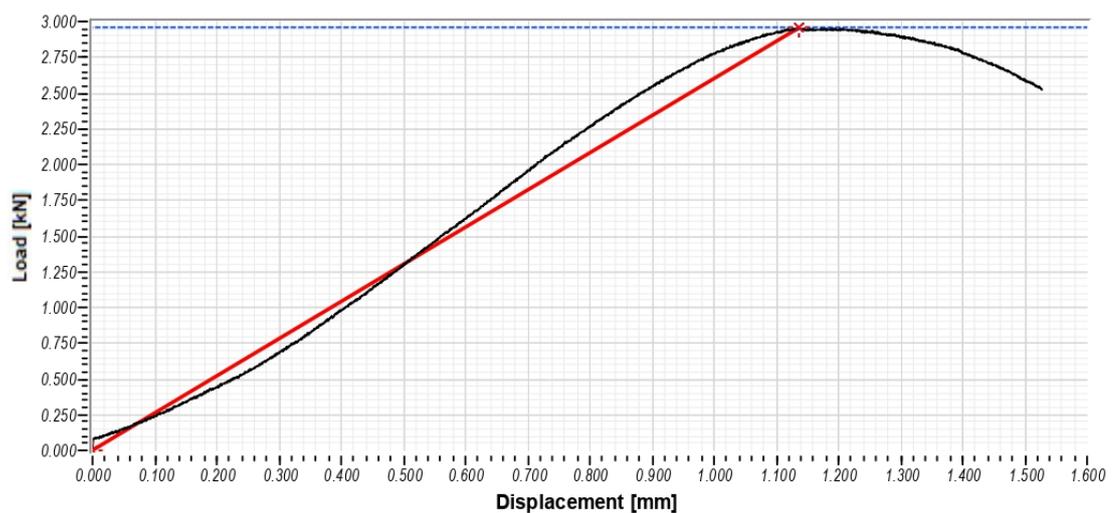
Operator

Hadj BEKKI



TEST CUSTOM

Certificate name		Certificate date	30/05/2021
Client			
Reference			
Test organization			
Testing apparatus			
Specimen ID	Argile Medrissa + 10%	Specimen number	3
Specimen description			
Type of binder	Verre	Type of aggregate	
Production site	Carriere de Medrissa	Production date	31/05/2021
Test type	Compression test	Sample type	d h
d [mm]	50.00	Equivalent area [mm ²]	1963.495
h [mm]	100.00	k1	1.00
		k2	1.00
Stability [kN]	2.956	Flow [mm]	1.14
		Tangent flow [mm]	1.14
Rigidity [kN/mm]			2.601
Test speed [mm/min]	0.230		
Notes			
Load [kN]	3	Displacement [mm]	1
		Stress [GPa]	1.506



Operator

Hadj BEKKI



TEST CUSTOM

Certificate name	Certificate date	05/06/2021
Client		
Reference		
Test organization		
Testing apparatus		

Specimen ID	Argile Nat + 20% verre	Specimen number	2
Specimen description	Argile de Medrissa + 10% verre apres essai Oedo	Type of aggregate	
Type of binder		Production date	31/05/2021
Production site	Carriere de Medrissa		

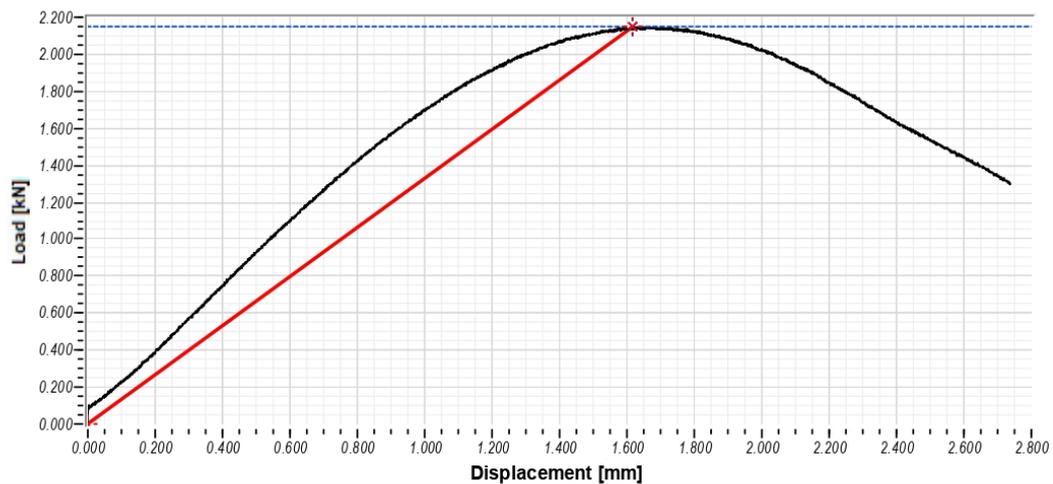
Test type	Compression test	Sample type	d h
d [mm]	50.00	Equivalent area [mm ²]	1963.495
h [mm]	100.00	k1	1.00
		k2	1.00

Stability [kN]	2.147	Flow [mm]	1.62	Rigidity [kN/mm]	1.328
		Tangent flow [mm]	1.62		

Test speed [mm/min] 0.230

Notes

Load [kN]	2	Displacement [mm]	2	Stress [GPa]	1.093
-----------	---	-------------------	---	--------------	-------



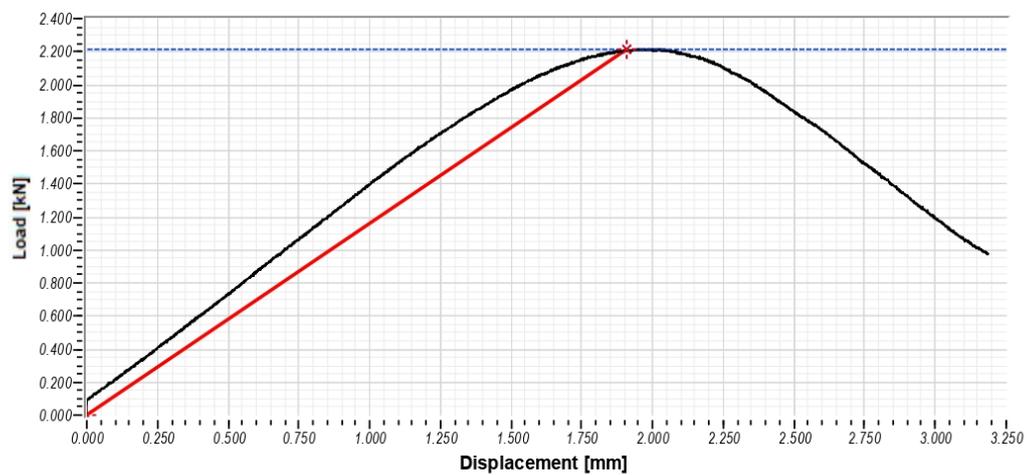
Operator

Hadj BEKKI



TEST CUSTOM

Certificate name		Certificate date	05/06/2021
Client			
Reference			
Test organization			
Testing apparatus			
Specimen ID	Argile Nat + 10% verre	Specimen number	5
Specimen description	Argile de Medrissa + 10% verre apres essai Oedo		
Type of binder		Type of aggregate	
Production site	Carriere de Medrissa	Production date	31/05/2021
Test type	Compression test	Sample type	d h
d [mm]	50.00	Equivalent area [mm ²]	1963.495
h [mm]	100.00	k1	1.00
		k2	1.00
Stability [kN]	2.215	Flow [mm]	1.91
		Tangent flow [mm]	1.91
		Rigidity [kN/mm]	1.159
Test speed [mm/min]	0.230		
Notes			
Load [kN]	2	Displacement [mm]	2
		Stress [GPa]	1.128



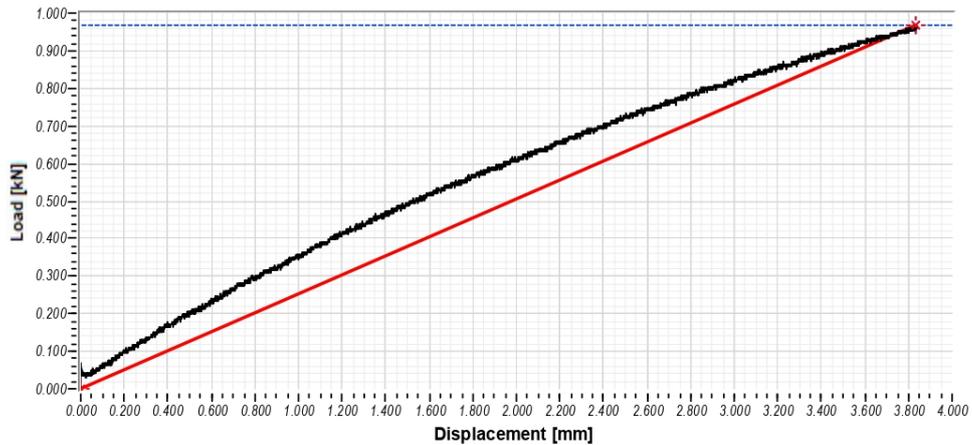
Operator

Hadj BEKKI



TEST CUSTOM

Certificate name		Certificate date	05/06/2021
Client			
Reference			
Test organization			
Testing apparatus			
Specimen ID	Argile Nat (10J)	Specimen number	3
Specimen description	Argile de Medrissa		
Type of binder		Type of aggregate	
Production site	Carriere de Medrissa	Production date	30/05/2021
Test type	Compression test	Sample type	d h
d [mm]	50.00	Equivalent area [mm ²]	1963.495
h [mm]	100.00	k1	1.00
		k2	1.00
Stability [kN]	0.967	Flow [mm]	3.83
		Tangent flow [mm]	3.83
		Rigidity [kN/mm]	0.253
Test speed [mm/min]	0.230		
Notes			
Load [kN]	1	Displacement [mm]	4
		Stress [GPa]	0.493

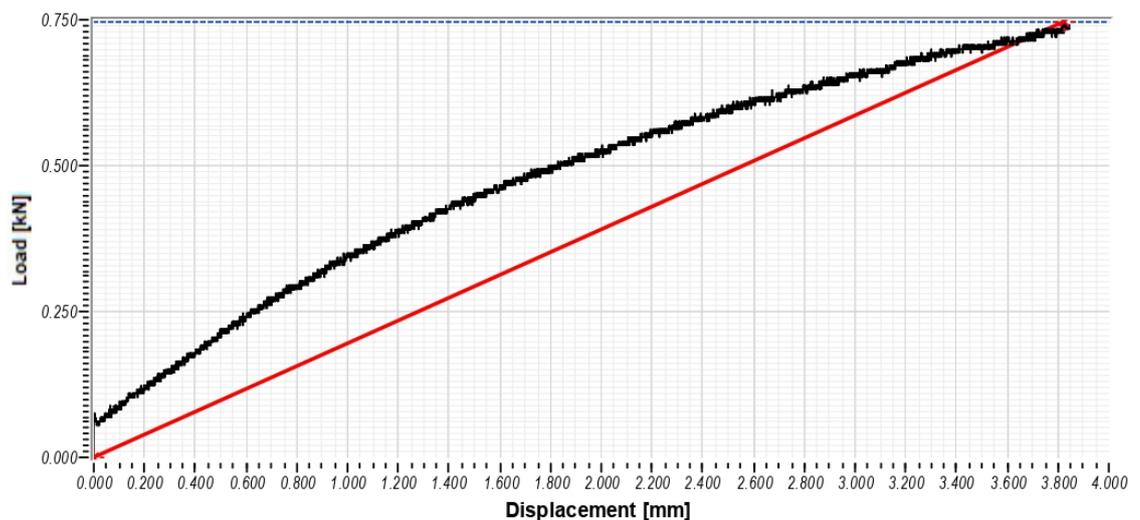


Operator
Hadj BEKKI



TEST CUSTOM

Certificate name		Certificate date	05/06/2021
Client			
Reference			
Test organization			
Testing apparatus			
Specimen ID	Argile Nat (10J)	Specimen number	4
Specimen description	Argile de Medrissa		
Type of binder		Type of aggregate	
Production site	Carriere de Medrissa	Production date	30/05/2021
Test type	Compression test	Sample type	d h
d [mm]	50.00	Equivalent area [mm ²]	1963.495
h [mm]	100.00	k1	1.00
		k2	1.00
Stability [kN]	0.748	Flow [mm]	3.83
		Tangent flow [mm]	3.83
Rigidity [kN/mm]			0.195
Test speed [mm/min]	0.230		
Notes			
Load [kN]	1	Displacement [mm]	4
		Stress [GPa]	0.381



Operator

Hadj BEKKI



TEST CUSTOM

Certificate name		Certificate date	05/06/2021
Client			
Reference			
Test organization			
Testing apparatus			

Specimen ID	Argile Nat + 30% verre	Specimen number	2
Specimen description	Argile de Medrissa + 30% verre	Type of aggregate	
Type of binder		Production date	31/05/2021
Production site	Carriere de Medrissa		

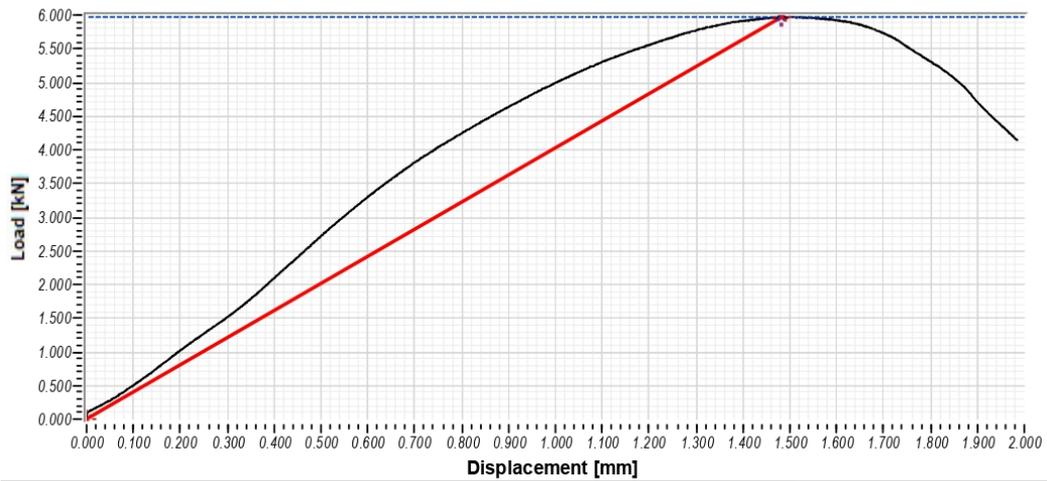
Test type	Compression test	Sample type	d h
d [mm]	50.00	Equivalent area [mm ²]	1963.495
h [mm]	100.00	k1	1.00
		k2	1.00

Stability [kN]	5.967	Flow [mm]	1.48	Rigidity [kN/mm]	4.027
		Tangent flow [mm]	1.48		

Test speed [mm/min] 0.230

Notes

Load [kN]	6	Displacement [mm]	1	Stress [GPa]	3.039
-----------	---	-------------------	---	--------------	-------



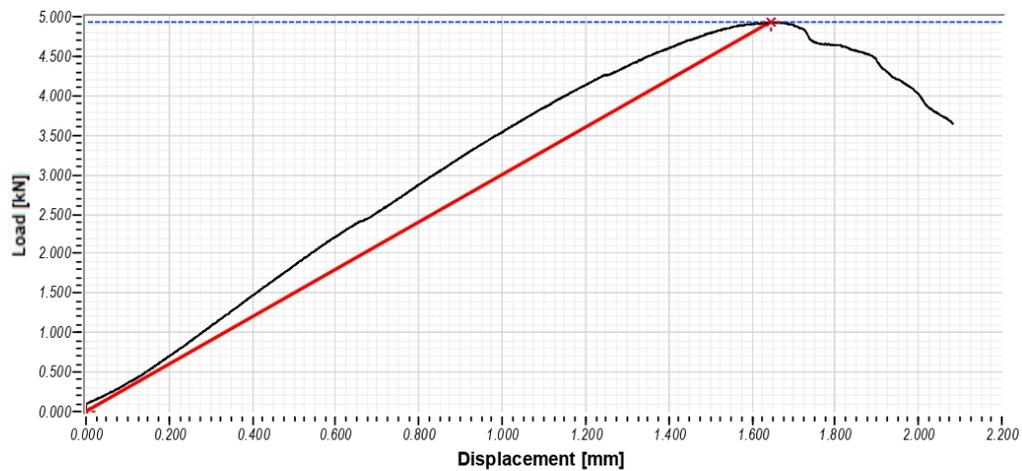
Operator

Hadj BEKKI



TEST CUSTOM

Certificate name		Certificate date	05/06/2021
Client			
Reference			
Test organization			
Testing apparatus			
Specimen ID	Argile Nat (14J)	Specimen number	3
Specimen description	Argile de Medrissa		
Type of binder		Type of aggregate	
Production site	Carriere de Medrissa	Production date	31/05/2021
Test type	Compression test	Sample type	d h
d [mm]	50.00	Equivalent area [mm ²]	1963.495
h [mm]	100.00	k1	1.00
		k2	1.00
Stability [kN]	4.931	Flow [mm]	1.64
		Tangent flow [mm]	1.64
		Rigidity [kN/mm]	2.998
Test speed [mm/min]	0.230		
Notes			
Load [kN]	5	Displacement [mm]	2
		Stress [GPa]	2.512



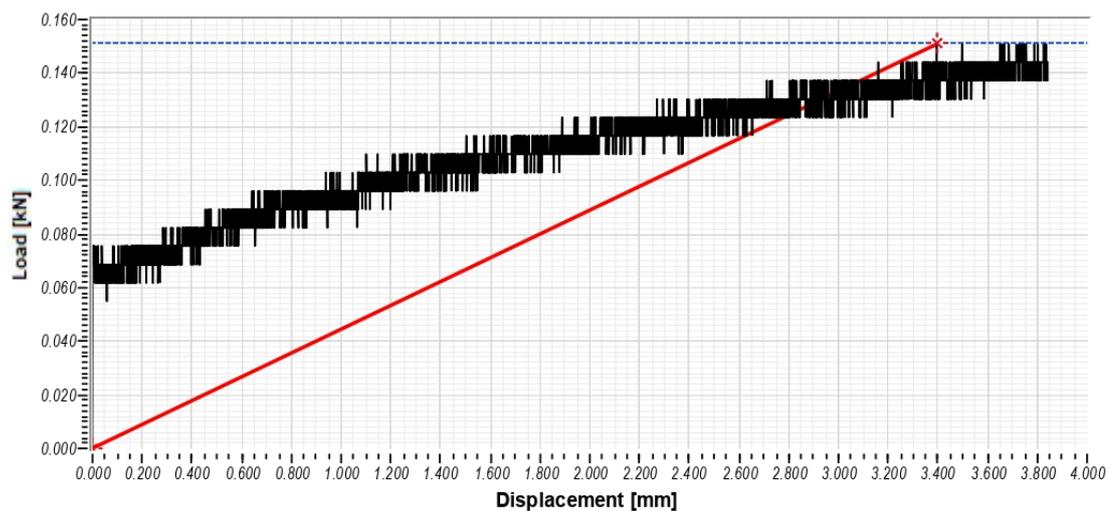
Operator

Hadj BEKKI



TEST CUSTOM

Certificate name		Certificate date	05/06/2021
Client			
Reference			
Test organization			
Testing apparatus			
Specimen ID	Argile MEDRISSA Nat	Specimen number	2
Specimen description	Argile MEDRISSA Nat	Type of aggregate	
Type of binder		Production date	30/05/2021
Production site	Carriere de Medrissa	Sample type	d h
Test type	Compression test	Equivalent area [mm ²]	1963.495
d [mm]	50.00	k1	1.00
h [mm]	100.00	k2	1.00
Stability [kN]	0.151	Flow [mm]	3.40
		Tangent flow [mm]	3.40
		Rigidity [kN/mm]	0.044
Test speed [mm/min]	0.230		
Notes			
Load [kN]	0	Displacement [mm]	3
		Stress [GPa]	0.077



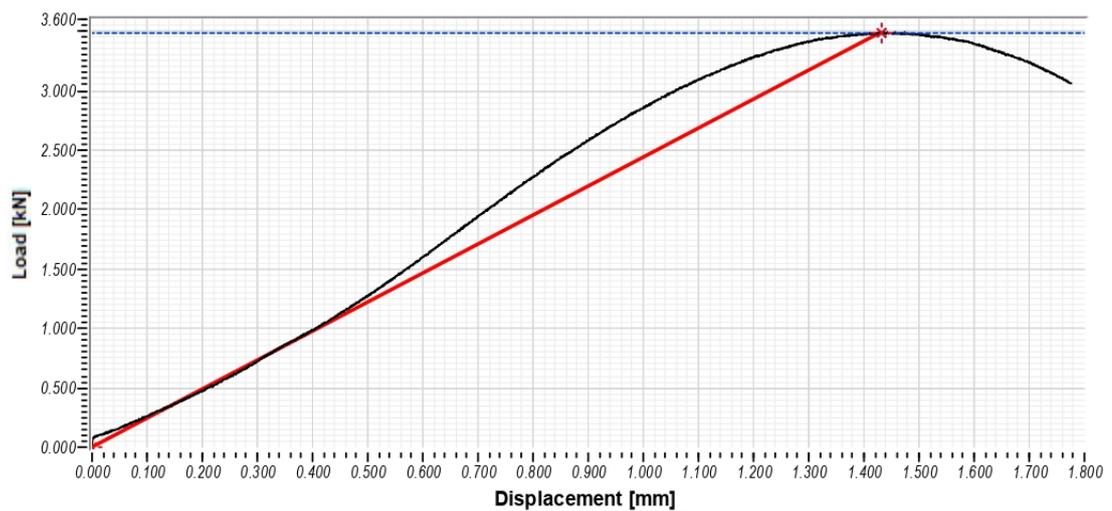
Operator

Hadj BEKKI



TEST CUSTOM

Certificate name		Certificate date	30/05/2021
Client			
Reference			
Test organization			
Testing apparatus			
Specimen ID	Argile Medrissa +20%	Specimen number	2
Specimen description			
Type of binder	Verre	Type of aggregate	
Production site	Carriere de Medrissa	Production date	31/05/2021
Test type	Compression test	Sample type	d h
d [mm]	50.00	Equivalent area [mm ²]	1963.495
h [mm]	100.00	k1	1.00
		k2	1.00
Stability [kN]	3.491	Flow [mm]	1.43
		Tangent flow [mm]	1.43
Rigidity [kN/mm]			2.439
Test speed [mm/min]	0.230		
Notes			
Load [kN]	3	Displacement [mm]	1
		Stress [GPa]	1.778



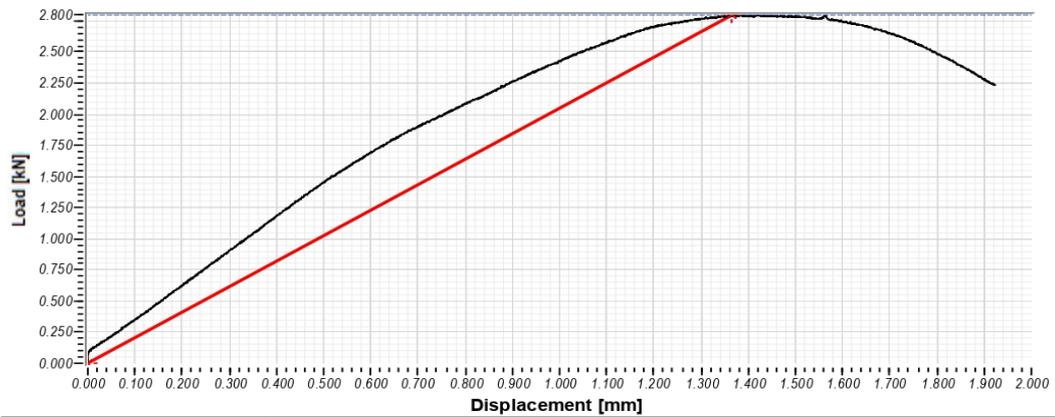
Operator

Hadj BEKKI



TEST CUSTOM

Certificate name		Certificate date	30/05/2021
Client			
Reference			
Test organization			
Testing apparatus			
Specimen ID	Argile Medrissa +10%	Specimen number	2
Specimen description			
Type of binder	Verre	Type of aggregate	
Production site	Carriere de Medrissa	Production date	31/05/2021
Test type	Compression test	Sample type	d h
d [mm]	50.00	Equivalent area [mm ²]	1963.495
h [mm]	100.00	k1	1.00
		k2	1.00
Stability [kN]	2.798	Flow [mm]	1.37
		Tangent flow [mm]	1.37
Rigidity [kN/mm]			2.047
Test speed [mm/min]	0.230		
Notes			
Load [kN]	3	Displacement [mm]	1
		Stress [GPa]	1.425



Operator
Hadj BEKKI

