

N° Ordre...../F.S.S. A/UAMOB/2023

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE D'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE AKLI MOHAND OULHADJ DE BOUIRA



Faculté des Sciences et des Sciences Appliquées
Département de Génie Civil

Mémoire de fin d'études

Présenté par :

Laoufi Mohamed Nour

Hamlaoui Eschareuf Zakaria

En vue de l'obtention du diplôme de Master

Filière : Génie Civil

Spécialité : Structures

Thème :

L'influence des ajouts sur la résistance d'une argile

Devant le jury composé de :

Belmihoub Hacene
Saoudi Nacira
Ladjel Lila

UAMOB / GENIE CIVIL	Encadreur
UAMOB / GENIE CIVIL	Examineur
UAMOB / GENIE CIVIL	Examineur

Année Universitaire 2022/2023

Remerciement

En premier lieu, nous souhaitons exprimer notre gratitude envers dieu qui nous a accordé la force, le courage surtout la santé tout au long de nos années d'études.

Nous voudrions adresser nos remerciements les plus chaleureux à monsieur Belmihoub Hacene, Maitre de conférences à l'université de Bouira, pour la qualité de son encadrement, sa patience et sa disponibilité constante. Nous sommes reconnaissant envers lui pour sa confiance et son soutien dès le début de ce travail, ainsi que pour ses qualités humaines remarquables.

Nous tenons à exprimer notre reconnaissance particulière envers Madame Chalabi louiza, responsable du laboratoire pédagogique de MDS, pour sa précieuse assistance et sa mise à disposition généreuse de tous les moyens nécessaires pendant les trois derniers mois passés au laboratoire ont grandement contribué à la réussite de notre travail. Nous lui sommes très reconnaissant pour son soutien inestimable.

Nous tenons à exprimer nos profondes gratitude envers Monsieur , Professeur à l'université de Bouira, pour l'honneur qu'il nous a fait en acceptant de présider le jury de notre soutenance. Nos remerciements les plus sincères lui sont adressés.

Nous tenons à exprimer nos profondes gratitude envers tous les membres du jury pour avoir accepté de juger ce travail. Nos sincères remerciements leur sont adressés.

Pour finir, nous tenons à exprimer notre gratitude envers toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail. Leur soutien, leurs conseils et leur implication ont été d'une importance capitale. Nous tenons à leur adresser nos sincères remerciements pour leur précieuse contribution.

Dédicace

S'il est coutume en de telles circonstances d'adresser une dédicace au-delà d'une simple tradition, nous tenons à dédier cet ouvrage.

A toutes personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail surtout nos parents qui nous ont appris à surmonter nos peurs et d'être la quand cela est nécessaire.

A nos sœurs et frères et ceux qui ont partagé avec nous tous les moments d'émotion lors de la réalisation de ce travail.

A tous nos amis qui nous ont toujours encouragé et à qui nous souhaitons plus de succès.

A tous ce que nous aimons.

Résumé

يتكون هذا العمل من دراسة تأثير بعض المواد و التي تتمثل في الزجاج و الجبس و المطاط على مقاومة التربة بحيث قمنا بطحنها و إضافة كل واحدة منها مع التراب بنسب مختلفة في تجربة تسمى بالقص, تمت هذه الدراسة داخل مخبر mds في جامعة البويرة.

Ce travail consiste à étudier l'effet de certains matériaux, que sont le verre, le gypse et le caoutchouc, sur la résistance du sol. Nous les avons broyés et ajoutés chacun d'eux à l'argile dans des proportions différentes dans une expérience appelée cisaillement, cette étude est réalisée au sein du laboratoire MDS de l'Université de Bouira.

This work consists of studying the effect of some materials, which are glass, gypsum, and rubber, on the resistance of the soil. We ground them and added each one of them to the clay in different proportions in an experiment called shearing. This study was carried out inside the MDS laboratory at the University of Bouira.

Sommaire

1	Introduction.....	15
2	Définition d'une argile.....	16
3	Histoire d'argile	16
4	Origine d'argile	17
5	Formation d'argile	18
6	Structure d'une argile.....	19
7	Structure moléculaire des argiles.....	20
8	Les différents types d'argile	21
8.1	La Kaolinite :	21
8.2	Les illites :	22
8.3	La Montmorillonite :	22
8.4	La Bentonite :	23
8.5	Smectites :	24
8.6	Chlorites :	24
8.7	Les sépiolites et les palygorskites :	25
8.8	Argile attapulgite :	25
8.9	Argile de feu :	26
9	Classification d'argile.....	26
9.1	Classification minéralogique :	26
9.2	Classification en fonction de la plasticité :	26
9.3	Classification en fonction de la capacité d'hydratation :	26
9.4	Classification en fonction de la granulométrie :	27
10	Classification selon la couleur	27
10.1	Verte :	27
10.2	Blanche :	27
10.3	Rose :	28
10.4	Rouge :	28
10.5	Jaune :	29
11	Surface spécifique des argiles	29
12	Morphologie des argiles.....	30
13	La minéralogie d'argile	30
14	Propriétés physicochimiques des argiles	31
14.1	Degré d'hydratation :	31
14.2	Capacité d'échange cationique (CEC) :	31

14.3	Charge des surfaces argileuses :.....	31
15	Les différentes caractéristiques des argiles	31
15.1	Caractéristiques minéralogique des argiles	31
15.1.1	Composition chimique :.....	31
15.1.2	Structure cristalline :	31
15.1.3	Propriétés d'échange d'ions :	32
15.1.4	Plasticité :	32
15.1.5	Absorption d'eau :	32
15.2	Caractéristiques physiques des argiles.....	33
15.2.1	Structure en feuillets :	33
15.2.2	Taille des particules :	33
15.2.3	Capacité d'absorption d'eau :.....	34
15.2.4	Plasticité :	34
15.2.5	Rétrécissement et gonflement :	34
15.2.6	Cohésion :	34
15.2.7	Faible perméabilité :	34
15.3	Caractéristiques mécaniques des argiles	34
15.3.1	Plasticité :	34
15.3.2	Cohésion :	34
15.3.3	Résistance à la compression :	34
15.3.4	Résistance au cisaillement :	35
15.3.5	Compressibilité :	35
15.4	Caractéristiques hydrauliques des argiles.....	35
15.4.1	Perméabilité :	35
15.4.2	Capacité de rétention d'eau :	35
15.4.3	Gonflement et retrait :	35
15.4.4	Courbe de retrait :	35
15.4.5	Potentiel hydrique :	35
16	Les minéraux argileux.....	36
16.1	Définitions des minéraux argileux.....	37
16.2	La formation des minéraux argileux.....	37
16.3	Minéraux argileux inter-stratifiés.....	37
16.4	Classification des minéraux argileux	38
16.4.1	Minéraux à 7 Å :	39
16.4.2	Minéraux à 10 Å :	39

16.4.3	Minéraux à 14 Å :	39
16.4.4	Minéraux inter stratifiés :	39
16.5	Rôle des minéraux argileux	41
16.5.1	Rôle dans les sols :	41
16.5.2	Rôle dans l'ingénierie géotechnique :	41
16.5.3	Rôle dans l'environnement :	41
16.5.4	Rôle dans les matériaux de construction :	41
16.5.5	Rôle dans l'industrie pétrolière :	41
16.6	Propriétés des minéraux argileux.....	42
16.6.1	Structure en feuillets :	42
16.6.2	Taille des particules :	42
16.6.3	Plasticité :	42
16.6.4	Gonflement et rétractation :	42
16.6.5	Capacité d'adsorption :	42
16.6.6	Échange d'ions :	42
16.6.7	Sensibilité à l'eau :	43
16.7	Propriétés physiques des minéraux argileux.....	43
16.8	Propriétés chimiques des minéraux argileux	43
16.9	Propriétés mécaniques des minéraux argileux	43
16.10	Propriétés électromagnétiques des minéraux argileux	43
16.11	Conclusion	43
17	Généralités sur ajouts	47
17.1	LE VERRE.....	47
17.1.1	Histoire du verre.....	47
17.1.2	Définition du verre	48
17.1.3	Structure du verre	48
17.1.4	Principaux composants du verre	50
17.1.5	Utilisation du verre.....	50
17.1.6	Influence du verre sur l'argile.....	50
17.2	Caoutchouc.....	51
17.2.1	Définition de Caoutchouc.....	51
17.2.2	Origine de caoutchouc	52
17.2.3	L'histoire de Caoutchouc.....	52
17.2.4	Types de caoutchouc.....	53
17.2.5	Formulation et vulcanisation.....	56

17.2.6	Utilisation	57
17.2.7	Influence de la poudre caoutchouc sur l'argile	58
17.3	Plâtre	58
17.3.1	Introduction.....	58
17.3.2	Définition.....	59
17.3.3	Origine	59
17.3.4	Comportement du plâtre	60
17.3.5	Composition du plâtre.....	60
17.3.6	Influence du plâtre sur l'argile	61
17.3.7	Conclusion	62
18	Essai : d'absorption et la réfraction.....	68
18.1.1	Essai : (d'absorption et la réfraction) d'argile	68
18.1.2	Essai : (d'absorption et la réfraction) du verre.....	69
18.1.3	Essai : (d'absorption et la réfraction) du plâtre.....	70
18.1.4	Essai : (d'absorption et la réfraction) du caoutchouc	71
19	Essai de cisaillement direct à la boîte.....	72
19.1	Introduction.....	72
19.2	Appareillage.....	72
19.3	Mode opératoire	73
19.4	Déroulement de l'essai.....	73
19.5	Toutes les lectures obtenues.....	74
	Essai de cisaillement des trois matériaux séparément	74
19.5.1	Echantillon N°1 : argile	74
19.6	Essais de cisaillement de l'argile avec des ajouts.....	75
19.6.1	Argile + verre :	75
19.6.2	Argile +plâtre :	81
19.6.3	Argile + caoutchouc :	86
19.7	Conclusion :	92

Liste des figures

Figure 1. L'observation au microscope électronique à balayage permet de visualiser la structure en feuillets des argiles.....	15
Figure 2. Processus d'origine d'argile.....	18
Figure 3. Processus de formation d l'argile.....	19
Figure 4. Les différents types de philo silicates formés au cours de l'altération.....	19
Figure 5. Voici une illustration schématique de l'organisation texturale d'une argile, d'après Touret (1988)..	20
Figure 6. Kaolinite.....	21
Figure 7. Les illites et structure d'illite.....	22
Figure 8. Montmorillonite	23
Figure 9. La structure de Montmorillonite.....	23
Figure 10. La Bentonite.....	23
Figure 11. Smectites.....	24
Figure 12. Chlorites.....	24
Figure 13. la structure des sépiolites et les palygorskites.....	25
Figure 14. Attapulгите.....	26
Figure 15. L'argile verte.....	27
Figure 16. L'argile blanche	28
Figure 17. L'agile rose.....	28
Figure 18. L'argile rouge.....	29
Figure 19. L'argile jaune.....	29
Figure 20. Représentation multi-échelle d'une argile.....	30
Figure 21. Analyse chimique d'argile verte type Montmorillonite.....	33

Figure 22. Taux absorption	68
Figure 23. Taux de réfraction.....	68
Figure 24. Les minéraux argileux.....	36
Figure 25. Structure des minéraux argileux.....	38
Figure 26. Feuille de type 2 :1.....	39
Figure 27. La classification des minéraux argileux.....	40
Figure 28. Poudre du verre.....	49
Figure 29 : Taux d'absorption.....	69
Figure 30 : Taux de réfraction	69
Figure 31. Poudre de caoutchouc.....	52
Figure 32. Molécule de caoutchouc naturel	54
Figure 33. Molécule du polychloroprène.....	55
Figure 34. Structure du monomère butadiène et de son polymère associé, le polybutadiène [16]..	55
Figure 35. Taux d'absorption.....	71
Figure 36. Taux de réfraction.....	71
Figure 37. Le plâtre.....	61
Figure 38. Taux d'absorption.....	70
Figure 39. Taux de réfraction.....	70
Figure 40. Appareillage de cisaillement direct à la boîte	72
Figure 41. Echantillon N°1 après cisaillement.....	73
Figure 42. Cisaillement de l'échantillon témoin (argile).....	74
Figure 43. Courbe intrinsèque de cisaillement de l'échantillon témoin (argile).....	74
Figure 44. Echantillon N°2 après cisaillement.....	75
Figure 45. Cisaillement de l'échantillon d'argile avec ajout de 5% de verre.....	75

Figure 46. Courbe intrinsèque de cisaillement de l'échantillon d'argile avec ajout de 5% de verre..	76
Figure 47. Comparaison entre les courbes intrinsèques de cisaillement de l'échantillon N° 1 et de l'échantillon N°2.....	76
Figure 48. Cisaillement de l'échantillon d'argile avec ajout de 10 % de verre.....	77
Figure 49. Courbe intrinsèque de cisaillement de l'échantillon d'argile avec ajout de 10% de verre....	77
Figure 50. Comparaison entre les courbes intrinsèques de cisaillement de l'échantillon N° 1 et de l'échantillon N° 3.....	78
Figure 51. Cisaillement de l'échantillon d'argile avec ajout de 15% de verre.....	79
Figure 52. Courbe intrinsèque de cisaillement de l'échantillon d'argile avec ajout de 15% de verre.....	79
Figure 53. Comparaison entre les courbes intrinsèques de cisaillement de l'échantillon N° 1 et de l'échantillon N°4.....	80
Figure 54. Echantillon N°5 après cisaillement.....	81
Figure 55. Cisaillement de l'échantillon d'argile avec ajout de 5% de Plâtre.....	81
Figure 56. Courbe intrinsèque de cisaillement de l'échantillon d'argile avec ajout de 5% de plâtre.....	82
Figure 57. Comparaison entre les courbes intrinsèques de cisaillement de l'échantillon N°1 et de l'échantillon N°5.....	82
Figure 58. Cisaillement de l'échantillon d'argile avec ajout de 10% de plâtre.....	83
Figure 59. Courbe intrinsèque de cisaillement de l'échantillon d'argile avec ajout de 10% de plâtre.....	83
Figure 60. Comparaison entre les courbes intrinsèques de cisaillement de l'échantillon N°1 et de l'échantillon N°6.....	84
Figure 61. Cisaillement de l'échantillon d'argile avec ajout de 15% de plâtre.....	84
Figure 62. Courbe intrinsèque de cisaillement de l'échantillon d'argile avec ajout de 15% de plâtre.....	85
Figure 63. Comparaison entre les courbes intrinsèques de cisaillement de l'échantillon N°1 et de l'échantillon N°7.....	85
Figure 64. Echantillon N°8 après cisaillement.....	86

Figure 65. Cisaillement de l'échantillon d'argile avec ajout de 5% de caoutchouc.....	87
Figure 66. Courbe intrinsèque de cisaillement de l'échantillon d'argile avec ajout de 5% de caoutchouc.....	87
Figure 67. Comparaison entre les courbes intrinsèques de cisaillement de l'échantillon N°1 et de l'échantillon N°8.....	88
Figure 68. Cisaillement de l'échantillon d'argile avec ajout de 10% Caoutchouc.....	88
Figure 69. Courbe intrinsèque de cisaillement de l'échantillon d'argile avec ajout de 10% de caoutchouc.....	89
Figure 70. Comparaison entre les courbes intrinsèques de cisaillement de l'échantillon N°1 et de l'échantillon N°8.....	89
Figure 71. Cisaillement de l'échantillon d'argile avec ajout de 15% Caoutchouc.....	90
Figure 72. Courbe intrinsèque de cisaillement de l'échantillon d'argile avec ajout de 15% de Caoutchouc.....	90
Figure 73. Comparaison entre les courbes intrinsèques de cisaillement de l'échantillon N°1 et de l'échantillon N°9.....	91

Liste des tableaux

Tableau : Classification des principaux groupes de minéraux argileux et de leurs espèces

INTRODUCTION GENERALE

Au cours des différentes époques de l'histoire humaine, les matériaux ont été largement utilisés dans divers domaines de la vie quotidienne. Avec l'évolution technologique au fil du temps, l'exploitation de ces matériaux s'est développée, conduisant à des avancées telles que des matériaux plus résistants, durables et adaptés aux besoins spécifiques de chaque domaine d'application. Que ce soit dans l'industrie, l'automobile, la santé, l'aéronautique, l'énergie ou d'autres secteurs, les matériaux jouent un rôle essentiel. Ils existent sous différentes formes dans la nature, dépendant des substances et des environnements qui les composent. Le terme "matériaux de construction" est utilisé pour décrire toutes les substances utilisées dans la fabrication et la construction de structures telles que les immeubles et les bâtiments. Au fil des dernières décennies, la demande d'utilisation de terrains pour la construction dans le domaine du génie civil n'a cessé de croître. Dans de tels cas, les ingénieurs se trouvent souvent contraints de renforcer ou d'améliorer les sols de faible portance.

Le comportement mécanique des argiles est en grande partie contrôlé par leur résistance au cisaillement qui dépend des caractéristiques intrinsèques à savoir l'angle de frottement interne et la cohésion. Des valeurs réduites de ces paramètres témoignent d'une faible résistance au cisaillement des argiles.

L'objectif principal de ce travail est d'étudier l'influence des ajouts sur la résistance d'une argile.

Ce travail comporte deux parties : une partie théorique généralités sur les argiles et les ajouts dont nous avons décidé de mener des essais sur un mélange sec d'argile avec des ajouts en poudre du plâtre, du verre et du caoutchouc, chaque ajout à une influence déférente sur l'argile. Et dans la partie expérimentale, nous avons présenté les résultats d'essais de cisaillement à la boîte de l'argile avec les ajoutes.

Pour arriver aux objectifs de l'étude, nous avons structuré le mémoire en trois chapitres :

Chapitre 1 : Généralité sur les argiles

Chapitre 2 : Généralité sur les ajouts

Chapitre 3 : Essai de cisaillement direct à la boîte

Pour conclure cette étude, nous avons formulé une conclusion générale qui résume l'ensemble des résultats obtenus.

Chapitre 01 : Généralités sur les argiles

1 Introduction

Depuis l'Antiquité, l'argile a été largement utilisée en tant que matière première. Son abondance explique son utilisation répandue au fil des siècles. Au début du 18^e siècle, les premières analyses chimiques effectuées sur le kaolin ont permis d'explorer le concept d'argile. Ce n'est qu'au 20^e siècle, grâce aux avancées dans les techniques de diffraction des rayons X et de granulométrie, que les chercheurs ont pu donner une définition précise de l'argile. Aujourd'hui, les argiles, en particulier celles riches en SiO₂ et Al₂O₃, sont utilisées dans divers domaines en raison de leurs propriétés. Elles trouvent leur application dans la fabrication de matériaux de construction, la production de matériaux polymères, le raffinage d'huile alimentaire, la cosmétique, la médecine, l'industrie pharmaceutique et la poterie [1].

L'argile est une substance naturelle composée de minéraux ayant une structure en plaques. Elle se forme par la décomposition de roches et de minéraux et est souvent présente dans les zones où les roches sont riches en parmi les minéraux, on retrouve le quartz, le feldspath et le mica. L'argile possède de nombreuses applications grâce à sa polyvalence. Elle est réputée pour ses propriétés absorbantes, adhésives et plastiques, ce qui lui permet d'être façonnée et modelée pour créer des formes complexes.

Dans le secteur de la construction, on fait appel à l'argile pour produire des briques, des tuiles, de la poterie et des enduits. Elle est également employée comme matériau de remplissage pour les murs en pisé, ainsi que comme revêtement pour les murs et les sols en raison de ses propriétés isolantes et de régulation de l'humidité. De plus, l'argile est utilisée dans la production de béton, où elle est mélangée avec du ciment et des agrégats pour améliorer la résistance et la durabilité du matériau.

L'argile est une substance naturelle d'une grande polyvalence, offrant des propriétés absorbantes, nettoyantes et purifiantes. Elle trouve des applications diverses, allant de la construction à l'industrie cosmétique et pharmaceutique. En plus de cela, l'argile est reconnue pour sa durabilité et son respect de l'environnement, ce qui en fait un choix privilégié pour les produits et matériaux respectueux de notre planète.

En résumé, l'argile est un matériau naturel aux multiples facettes, largement utilisé dans de nombreux domaines. Ses propriétés absorbantes, adhésives et plastiques en font une ressource précieuse pour une variété d'applications, allant des soins de la peau à la construction et à l'industrie.

2 Définition d'une argile

L'argile est une roche sédimentaire fine-graine composée principalement de minéraux d'argile tels que la montmorillonite, l'illite et la kaolinite. Elle se forme par la décomposition et l'altération des roches silicatées comme le granite, le schiste et le basalte.

D'un point de vue géologique, l'argile est classée comme une roche sédimentaire clastique, constituée de fragments de roches et de minéraux d'une taille inférieure à 0,063 millimètres. On peut la trouver dans des dépôts des marins, lacustres ou alluviaux, souvent associés à d'autres types de roches sédimentaires comme le sable et le limon.

L'argile est réputée pour sa plasticité, ce qui lui confère la capacité d'être façonnée et modelée lorsqu'elle est humide, puis de durcir en séchant à l'air libre ou sous l'effet de la chaleur. Grâce à cette caractéristique, On retrouve couramment l'utilisation de l'argile dans la fabrication d'objets tels que la poterie, les briques, les tuiles, les céramiques et d'autres produits similaires. De plus, elle présente une multitude d'applications dans des domaines tels que le traitement des eaux usées et la décontamination des sols., la séparation des particules dans l'industrie minière, ainsi que dans les secteurs alimentaire et pharmaceutique, en raison de ses propriétés absorbantes et de sa capacité à purifier et adoucir la peau. De plus, l'argile est utilisée en géologie pour la datation des roches et des fossiles. [2]



Figure1. L'observation au microscope électronique à balayage permet de visualiser la structure en feuillets des argiles. [5].

3 Histoire d'argile

Depuis des milliers d'années, l'argile, une substance naturelle, a été employée par les humains. Présente dans de nombreuses régions à travers le monde, elle a été utilisée à diverses fins au cours de l'histoire de l'humanité.

Les premières utilisations connues de l'argile remontent à environ 5 000 ans avant notre ère, lorsque les Sumériens ont commencé à l'utiliser pour créer des objets en céramique. Les Égyptiens ont également utilisé l'argile pour fabriquer des briques, des poteries et des figurines.

Dans les siècles qui ont suivi, l'utilisation de l'argile s'est développée dans de nombreuses cultures. Les Grecs l'ont utilisée pour créer des sculptures, les Romains pour construire des aqueducs et des canalisations, et les Chinois pour fabriquer de la porcelaine.

L'argile a également été utilisée dans de nombreux domaines médicaux. Les anciens Égyptiens l'utilisaient pour traiter les blessures et les maladies, tandis que les Grecs l'utilisaient pour traiter les problèmes gastro-intestinaux. Au Moyen Âge, l'argile a été utilisée pour traiter les infections et les plaies.

De nos jours, l'argile continue d'être abondamment utilisée tant dans l'industrie de la céramique que dans le domaine de la construction, la médecine et la cosmétique. Elle est également utilisée pour la fabrication de matériaux réfractaires, de papier, de produits de filtration et de produits pour l'agriculture.

En somme, l'histoire de l'argile est très riche et diversifiée, et continue d'être un matériau important dans de nombreux aspects de la vie humaine à travers les siècles.

4 Origine d'argile

Les argiles sont des minéraux de silicates d'aluminium hydratés, qui se forment par la dégradation chimique et physique des roches préexistantes telles que les feldspaths et les micas. Les argiles peuvent se former dans différents environnements géologiques tels que les sols, les lacs, les rivières, les océans et les dépôts de sédiments.

La formation des argiles se produit par des processus de dissolution, d'altération et de précipitation. Les roches préexistantes sont altérées par l'eau, les acides, les micro-organismes et les racines des plantes, ce qui libère les éléments qui composent les minéraux de silicates. Ces éléments se dissolvent dans l'eau et se déplacent, formant de nouveaux minéraux par précipitation.

Les argiles peuvent également se former à partir de cendres volcaniques, de matériaux organiques décomposés et de résidus météoriques. Les argiles peuvent être transportées par l'eau et le vent, formant des dépôts de sédiments qui peuvent s'accumuler et se solidifier en roches sédimentaires.

Les argiles sont des minéraux très répandus dans la croûte terrestre et ont une origine diverse. Ils peuvent être formés par l'altération chimique de roches préexistantes, la sédimentation, ou encore la précipitation à partir de solutions aqueuses.

L'altération chimique des roches préexistantes est une des principales sources d'argiles. Les roches ignées ou métamorphiques sont transformées en argiles par l'action de l'eau et des gaz qui réagissent avec les minéraux présents dans la roche. Ce processus, appelé altération hydrothermale, peut prendre des millions d'années.

En somme, les argiles sont le produit de processus géologiques complexes qui se produisent à la surface de la Terre et qui impliquent des interactions entre les roches, l'eau, les micro-organismes et les facteurs environnementaux. [3]

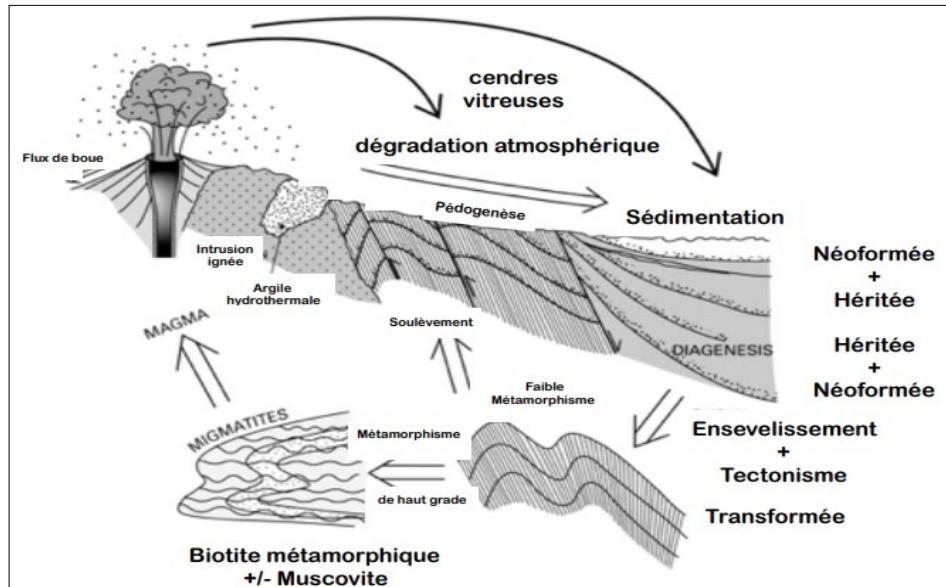


Figure 2. Processus d'origine d'argile

5 Formation d'argile

Les argiles sont le résultat de processus de formation continuels dans le sol. Leur apparition est liée à trois principaux processus de formation qui se superposent. Le premier processus est lié à la décomposition des roches par le phénomène de l'érosion. L'érosion des sols est caractérisée par de nombreux phénomènes tels que la pluie, le vent, le gel, le dégel, les vagues, et d'autres forces naturelles qui contribuent à la formation de l'argile. Le deuxième processus, appelé néoformation, implique la création de nouveaux minéraux. Les substances transportées par l'eau du sol se combinent pour former une structure minérale. Le troisième mécanisme concerne les processus de transformation des minéraux, qui peuvent évoluer soit par dégradation (perte d'équilibre du sol), soit par aggradation (accumulation de sédiments dans un cours d'eau due à un excès de transport par l'eau) des ions minéraux argileux [4].

Les roches argileuses sont présentes presque partout à la surface de la planète, mais leurs propriétés et leur composition varient en fonction des conditions de formation. Au fil du temps géologique, la dégradation des différentes roches contribue à la diversité des argiles. L'argile est influencée par plusieurs facteurs, tels que le type de roche d'origine, le climat et la topographie du sol. Par exemple, un climat froid aura un impact moins prononcé sur l'altération de la roche.

Les minéraux argileux conservent une composition similaire à celle des minéraux issus de la roche d'origine. C'est le cas des illites et des chlorites. Dans des conditions climatiques chaudes et humides, une hydrolyse intense favorise la formation de kaolinites et de smectites. Dans un climat tempéré, un processus d'altération modérée se produit, donnant lieu à la création d'argiles telles que les illites, les chlorites ou les

vermiculites. La topographie des sols peut également influencer la composition de l'argile. Par exemple, dans une zone pentue, un drainage efficace favorise la formation de kaolinite. En revanche, dans des zones confinées comme des cuvettes, les smectites se forment grâce à une concentration spécifique.

Les différentes voies de formation des argiles sont appelées processus d'altération. Les argiles résiduelles se forment par la dégradation des roches, qui s'accumulent par l'érosion éolienne ou hydrique, conduisant ainsi à la formation des argiles [6]. Les argiles fibreuses, quant à elles, éprouvées des croûtes de calcaire. Ces zones, caractérisées par un climat sec et une concentration élevée en sels, peuvent se former en solution, grâce à une abondance d'ions [6]. De plus, une argile néoformée peut être évaluée en fonction de son environnement par l'addition ou la suppression d'ions. En effet, il est possible qu'une kaolinite subisse une transformation en chlorite, tandis que des smectites peuvent être estimées vers des illites [6].

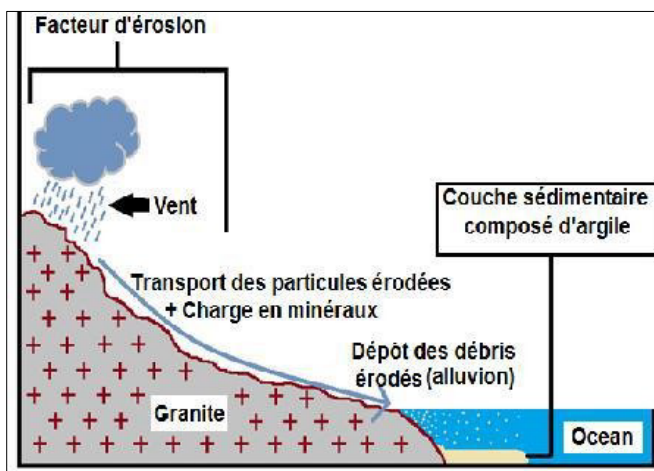


Figure 3. Processus de formation de l'argile

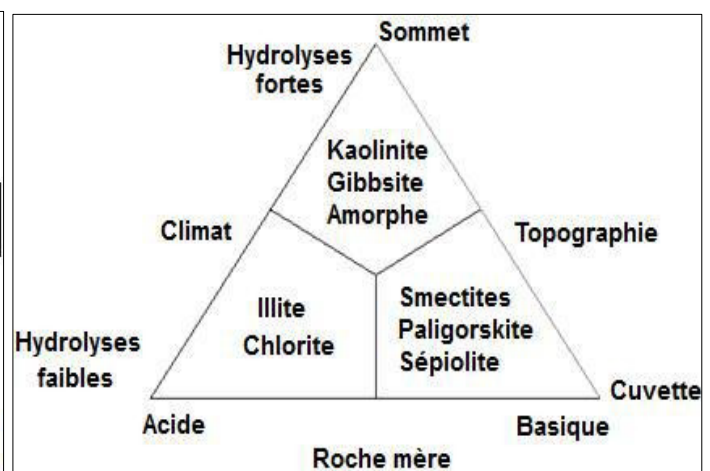


Figure 4. Les différents types de phyllosilicates formés au cours de l'altération.

6 Structure d'une argile

Les minéraux argileux sont des silicates de phyllosilicates hydratés de petite taille. Dans tous les domaines, la structure cristalline des argiles joue un rôle crucial car elle détermine les propriétés physiques du minéral (Caillère & Hénin, 1959). Les minéraux argileux se composent principalement de phyllosilicates, qui sont formés par un empilement de feuillets. La Figure 5 présente la terminologie utilisée pour décrire la structure des argiles, en distinguant trois niveaux d'organisation :

- Les feuillets, qu'ils soient tétraédriques ou octaédriques,
- Les particules, qui résultent de combinaisons ou d'arrangements de feuillets,
- Les agrégats, qui se forment par l'association de plusieurs particules.

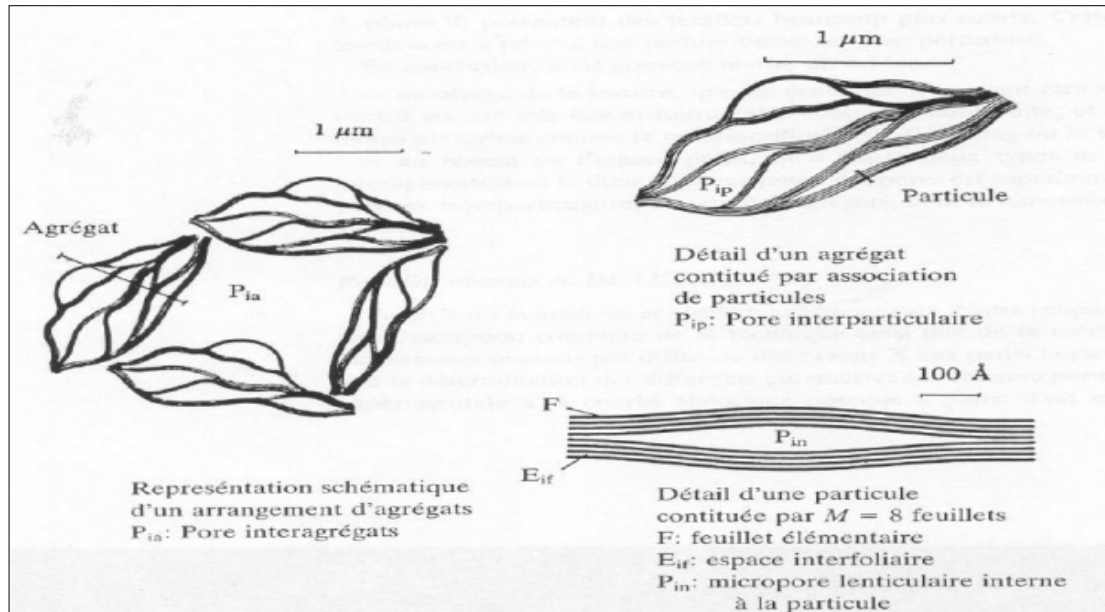


Figure 5. Voici une illustration schématique de l'organisation texturale d'une argile, d'après Touret (1988).

Les argiles sont des minéraux naturels qui se forment par la décomposition de roches silicatées telles que le feldspath et le mica. Leur structure est caractérisée par des feuillets cristallins qui sont empilés les uns sur les autres.

Chaque feuillet cristallin est composé de couches tétraédriques et octaédriques. Les couches tétraédriques sont constituées de quatre atomes d'oxygène disposés autour d'un atome de silicium, formant ainsi une structure en forme de tétraèdre. Les couches octaédriques, quant à elles, sont formées de six atomes d'oxygène disposés autour d'un atome de métal tel que l'aluminium, le magnésium ou le fer.

Les feuillets cristallins d'argile sont maintenus ensemble par des forces électrostatiques connues sous le nom de forces de Van der Waals. Cela permet aux feuillets de glisser les uns sur les autres, ce qui confère à l'argile ses propriétés de plasticité et de malléabilité [8].

7 Structure moléculaire des argiles

La compréhension de la structure moléculaire des argiles repose sur des études scientifiques approfondies menées dans Les champs d'étude de la minéralogie et de la géologie. Les argiles appartiennent au groupe des phyllo silicates, qui se caractérisent par une structure en feuillets. Chaque feuillet est constitué de tétraèdres et d'octaèdres interconnectés par des liaisons covalentes. Les tétraèdres se forment lorsque quatre atomes d'oxygène s'associent autour d'un atome de silicium., créant ainsi une structure tétraédrique. Les octaèdres, quant à eux, consistent en six atomes d'oxygène entourant un atome métallique tel que l'aluminium, le magnésium ou le fer, formant ainsi une structure octaédrique. Les tétraèdres et les octaèdres s'unissent par des partages d'oxygène, formant des couches alternées de tétraèdres et d'octaèdres. Ces couches peuvent s'empiler les unes sur les autres, créant ainsi une structure lamellaire. Les feuillets de

tétraèdres et d'octaèdres sont maintenus ensemble par des forces électrostatiques et des interactions de van der Waals.

Entre les feuillets des argiles, on trouve des espaces inter foliaires qui contiennent des cations. Les cations présents peuvent être des ions monovalents tels que le sodium (Na^+) ou le potassium (K^+), ainsi que des ions divalents comme le calcium (Ca^{2+}) ou le magnésium (Mg^{2+}), ainsi que d'autres cations. Ces cations sont généralement échangeables, ce qui signifie qu'ils peuvent être substitués par d'autres cations en fonction des conditions environnementales.

Il existe différents types d'argiles tels que la montmorillonite, la kaolinite, l'illite, la smectite, etc., qui se distinguent par leur composition chimique et leur arrangement structural spécifique. Chaque type d'argile possède des propriétés physiques et chimiques distinctes en raison de sa structure moléculaire unique.

Il convient de souligner que la structure moléculaire des argiles peut varier en fonction de leur composition chimique spécifique, de la présence d'impuretés et des conditions environnementales lors de leur formation. Cette variabilité conduit à une diversité de propriétés et d'utilisations des argiles dans différents domaines tels que l'industrie, la géologie, l'agriculture et la céramique, entre autres.

8 Les différents types d'argile

Il existe plusieurs types d'argile couramment utilisés :

8.1 La Kaolinite :

Connue sous le nom d'"argile blanche" est utilisée dans l'industrie de la céramique et de la porcelaine [9]. Son appellation provient de la région chinoise de sa découverte (Kao-Ling), où elle était utilisée dans la fabrication de porcelaine. Il s'agit d'une argile à deux couches ayant une composition principale de 48% de silice et 36,5% d'alumine. De plus, elle possède une grande capacité de couverture [10].

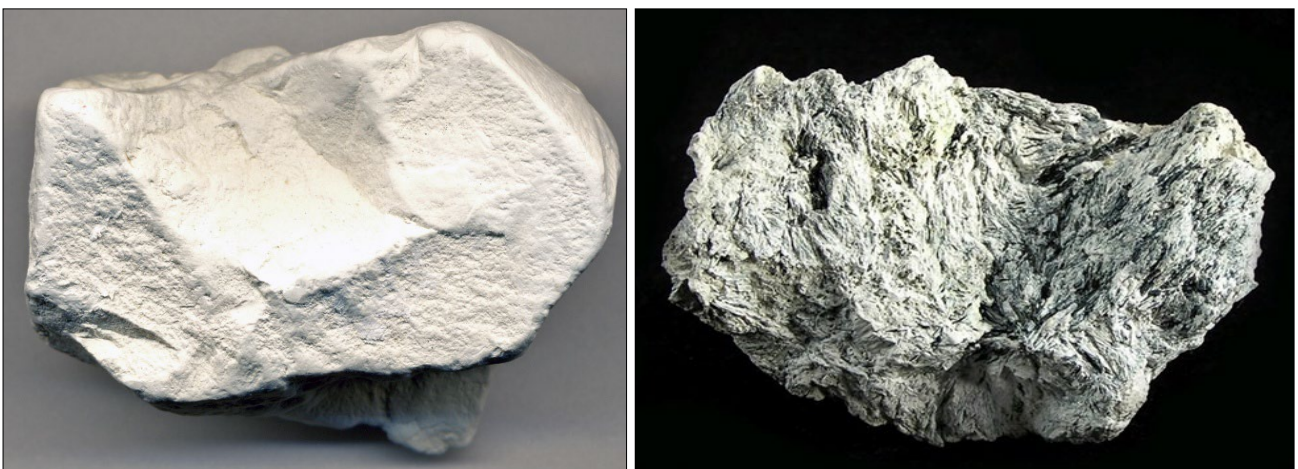


Figure .6. kaolinite

8.2 Les illites :

Les illites, qui tirent leur nom de l'état américain de l'Illinois, sont des argiles assez composées, notamment dans les sols. Elles sont dérivées des micas blancs et sont riches en potassium et en alumine. Les minéraux à trois couches sont composés de trois couches d'octaèdres à noyau d'aluminium placés entre deux couches tétraédriques à noyau de silicium. Leur capacité d'adsorption est réduite en raison d'une surface "moyennement" développée. Leur couleur varie du gris blanc au brun clair en fonction de la présence d'impuretés métalliques [10]. La formule chimique structurale des illites est $KAl_2(OH)_2(AlSi_3(O, OH)_{10})$. L'espace inter foliaire mesure 10 Å [11].

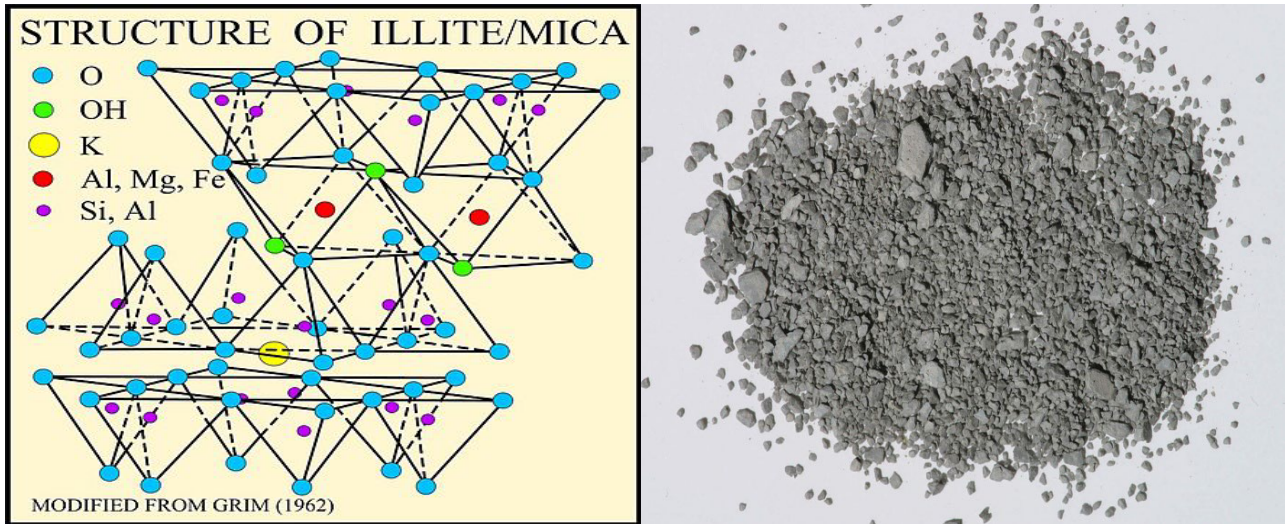


Figure 7. les illites et structure d'illite

8.3 La Montmorillonite :

La Montmorillonite, également appelée argile verte de Provence, est extraite des strates de Mormoiron dans le Vaucluse, qui lui donne son nom. Les montmorillonites sont des argiles gonflantes composées de trois couches avec une concentration élevée en silice (48,25%) et une composition minérale équilibrée (11,17% d'alumine, 9,66% de magnésium, 3,90% de fer, 3,03% de potassium, ainsi que du calcium, du phosphore, du sodium et du cuivre et du zinc, du sélénium, du cobalt, du manganèse...) [10]. Elles sont expansives et utilisées dans les produits d'étanchéité, les agents de floculation et les produits pharmaceutiques [12]. Elles sont capables de changer d'espace entre leurs canapés par absorption d'eau, ce qui leur confère le pouvoir fixateur le plus élevé parmi les argiles connues.



Figure 8. Montmorillonite

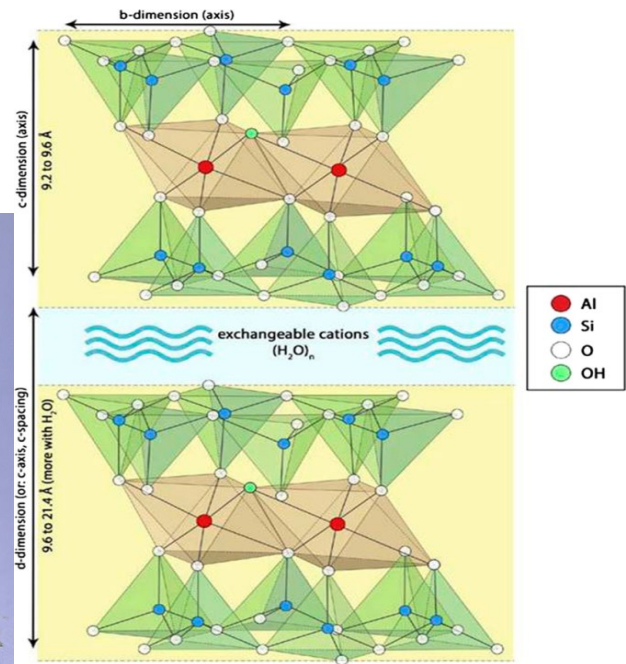


Figure 9. la structure de Montmorillonite

8.4 La Bentonite :

La bentonite est une argile dotée d'une capacité d'absorption d'eau élevée et elle est utilisée dans divers produits cosmétiques, cataplasmes et systèmes de forage [13]. Naturellement, elle est constituée d'un mélange d'argiles gonflantes associées à de minuscules particules de quartz ou d'hydroxydes colloïdaux. C'est pourquoi sa couleur peut varier du blanc crème au brun, voire au gris foncé. Ses propriétés spécifiques telles que la viscosité, la plasticité, le retrait-gonflement et Le pouvoir de liaison provient de la structure en feuillets cristallins [14].



Figure 10. La Bentonite

8.5 Smectites :

Les Smectites sont une famille d'argiles comprenant les montmorillonites, les bentonites, les saponites, les nontronites et les beidellites [15]. Ces différentes argiles sont réputées pour leur capacité à retenir les molécules d'eau, ce qui les classe parmi les argiles gonflantes. Lorsqu'elles sont exposées à l'eau, elles peuvent augmenter leur volume jusqu'à 30 %. En emprisonnant l'eau, elles retiennent également des cations, ce qui permet des échanges par adsorption. Elles adoptent alors une texture de type gel, capable de transporter des ions ou des molécules actives. Cette caractéristique forme la base des technologies utilisées dans les pansements destinés au tube digestif [R. Prost, 1975].



Figure 11. Smectites

8.6 Chlorites :

Les chlorites tirent leur nom de leur teinte verdâtre, dérivé du mot grec "chloros" signifiant "vert". On peut également trouver des chlorites de couleur jaune, rouge ou blanche. Leur structure est similaire à celle des illites et des smectites, avec une couche supplémentaire d'hydroxyde de magnésium, de fer ou d'aluminium entre leurs feuillets [16].

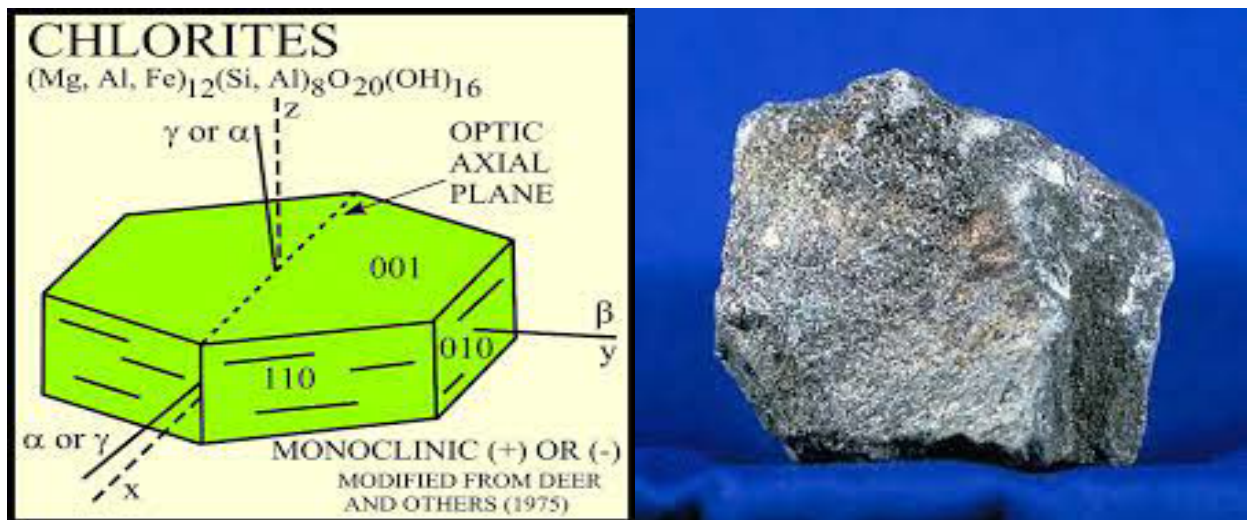


Figure 12. Chlorites

8.7 Les sépiolites et les palygorskites :

Les sépiolites et les palygorskites connues, également sous le nom d'argiles magnésiennes, sont des types d'argiles qui se distinguent par leur structure en tubes empilés plutôt que des feuillets. Cette particularité leur permet d'adsorber des gaz. Les sépiolites et les palygorskites sont deux types distincts d'argiles fibreuses. Bien qu'elles présentent des similarités en apparence, elles présentent des propriétés et des utilisations différentes.

La sépiolite, également appelée argile d'attapulгите, est une argile fibreuse qui présente une structure en forme de chaîne. Elle est principalement utilisée dans la fabrication de matériaux absorbants, de produits de filtration, d'additifs pour litières pour chats et autres applications industrielles, en raison de sa grande capacité à absorber des quantités importantes d'eau et d'autres liquides.

La palygorskite, également connue sous le nom d'argile de terra rosa ou d'argile de palygorskites, est une autre forme d'argile fibreuse qui se présente sous la forme de fines aiguilles. Elle trouve une utilisation dans diverses applications, notamment en tant qu'agent de support dans les catalyseurs, dans l'industrie des matériaux de construction, dans les produits de forage pétrolier et dans certains produits pharmaceutiques. Il existe de nombreuses autres familles d'argiles avec des comportements variés, mais elles sont rarement présentes sous une forme pure sur le marché, à l'exception peut-être des vermiculites utilisées dans la culture des légumes et comme matériau isolant [17].

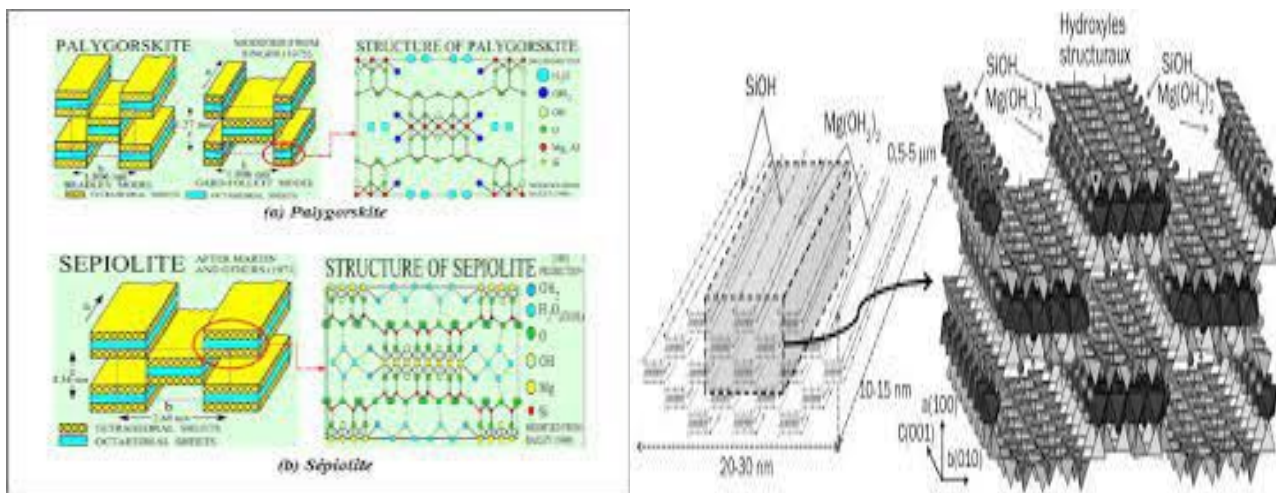


Figure 13. la structure des sépiolites et les palygorskites

8.8 Argile attapulгите :

Également appelée palygorskite, est une argile fibreuse possédant des propriétés liées. Elle est utilisée dans divers domaines tels que les matériaux de construction, les catalyseurs, les produits de forage pétrolier et les produits pharmaceutiques [18].



Figure 14. attapulgite

8.9 Argile de feu :

L'argile réfractaire se présente sous la forme de fines aiguilles., est une argile capable de résister aux températures élevées. Elle est utilisée dans la fabrication de briques réfractaires, de tuiles et de céramiques destinées aux environnements de cuisson, aux revêtements de fours et à d'autres applications nécessitant une résistance thermique élevée. Cette argile est spécialement formulée pour avoir une faible dilatation thermique et une grande résistance aux températures extrêmes. Elle peut supporter des températures généralement comprises entre 1200 et 1800 degrés Celsius. L'argile de feu peut être composée de différents minéraux argileux tels que la kaolinite, l'illite, la montmorillonite, ainsi que d'autres additifs réfractaires visant à améliorer ses propriétés thermiques.

9 Classification d'argile

Les argiles peuvent être classifiées en fonction de leur composition minérale, de leur plasticité, de leur capacité d'hydratation et de leur plasticité.

9.1 Classification minéralogique :

Les argiles se composent couramment de minéraux tels que la kaolinite, l'illite, la montmorillonite, les smectites et le chlorite. Cette classification repose sur les proportions relatives de ces minéraux dans la composition de l'argile. [19]

9.2 Classification en fonction de la plasticité :

Selon leur aptitude à être modelées sans se fissurer, les argiles peuvent être classées en tant qu'argiles non plastiques, légèrement plastiques, modérément plastiques ou très plastiques. [20]

9.3 Classification en fonction de la capacité d'hydratation :

En fonction de leur capacité à absorber l'eau et à augmenter leur volume, les argiles peuvent être classées en argiles expansives ou argiles non expansives. [21]

9.4 Classification en fonction de la granulométrie :

Les argiles peuvent être classées en fonction de la granulométrie des particules, allant des argiles grossières (sableuses) aux argiles fines (limoneuses) et aux argiles ultrafines (argiles). [22]

Ces classifications peuvent varier selon le domaine d'application spécifique, tels que la géologie, la céramique, la construction ou l'ingénierie des sols.

10 Classification selon la couleur

La couleur des argiles ne permet pas de les identifier de manière précise. Plusieurs types d'argiles peuvent présenter une même couleur, par exemple le vert peut être observé dans la montmorillonite, l'illite ou le chlorite, etc. La variation de couleur est principalement due à la concentration en oxyde de fer. [23]

10.1 Verte :

Les argiles de couleur verte, telles que les montmorillonites, les illites et les smectites, se caractérisent par leur faible teneur en fer.



Figure 15. l'argile verte

10.2 Blanche :

Ces argiles sont dépourvues de toute substance colorée, ce qui indique une formation uniforme sans perturbation. On observe principalement la présence de kaolinites, mais on peut également trouver des smectites. [24]



Figure 16. l'argile blanche

10.3 Rose :

Ces roches argileuses ne se trouvent pas naturellement sous cette forme. Elles sont en réalité un mélange d'argile rouge et d'argile blanche. Ce mélange est effectué dans le but d'accroître la concentration en oligo-éléments de l'argile blanche tout en réduisant la concentration en fer de l'argile rouge. [25]



Figure 17. l'argile rose

10.4 Rouge :

Ces argiles, principalement composées d'illites, présentent une teneur élevée en oxyde de fer. Elles sont extrêmement reminéralisantes et constituent un choix idéal pour une utilisation externe sur les peaux irritées, fatiguées ou ternes, car elles ont des propriétés adoucissantes et purifiantes. [26]



Figure 18. l'argile rouge

10.5 Jaune :

Ces illites, qui sont riches en oxyde de fer et en magnésie, possèdent des propriétés apaisantes qui peuvent soulager diverses douleurs (articulaires, musculaires) et tonifier la peau. Lorsqu'elles sont utilisées sous forme de masques, elles sont particulièrement appréciées par les peaux et les cheveux normaux.[26]

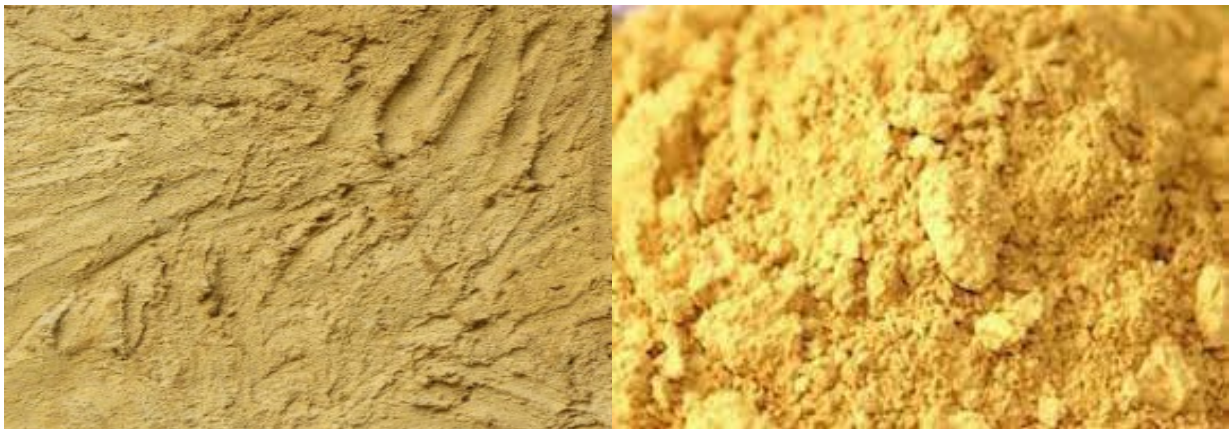


Figure 19. l'argile jaune

11 Surface spécifique des argiles

La surface spécifique, également connue sous le nom d'"aire massique", est définie comme la surface totale (ST) d'un matériau par unité de masse (M) et est généralement exprimée en m^2/g . Les minéraux argileux présentent une surface supérieure à celle des minéraux de taille similaire mais de forme différente [45]. La surface spécifique est directement influencée par la forme des particules.

La Ss des argiles est déterminée par leur texture fine et leur structure cristalline en couches. Cette grande surface spécifique leur donne une forte capacité d'adsorption et de rétention d'eau et d'éléments nutritifs.

Cependant, cette même surface spécifique peut également causer des problèmes de compactage du sol et de blocage des pores, ce qui peut affecter la croissance des plantes et la qualité des sols agricoles.

12 Morphologie des argiles

L'organisation structurale des argiles implique différentes échelles d'observation [27, 28]. Examinons une argile depuis l'échelle la plus élevée jusqu'à l'échelle atomique. L'échelle la plus élevée correspond à celle où nous pouvons observer l'argile à l'œil nu. À cette échelle, l'argile se présente sous forme de poudres extrêmement fines. Les petites particules que nous pouvons voir sont désignées comme des "amas" et ont une épaisseur supérieure à dix microns. En réduisant le niveau de zoom, chaque amas est constitué d'"agrégats" qui ont une épaisseur de l'ordre du micron. Ces agrégats peuvent être subdivisés en petites particules appelées "particules primaires". La plupart du temps, ces particules primaires sont empilées les unes sur les autres dans une structure pseudo-rectangulaire. Elles sont elles-mêmes composées de "cristaux semblables" (également appelés "particules") d'une épaisseur d'environ 8 à 10 nanomètres. Pour finir, chaque tactoïde est composé de plusieurs "feuillets" d'une épaisseur d'environ un nanomètre et de dimensions latérales allant de quelques dizaines à quelques centaines de nanomètres. Ces différentes échelles sont illustrées dans la Figure 8. Dans les amas, les feuilles peuvent s'empiler de trois manières différentes : (i) il peut y avoir une régularité de translation entre les feuilles, ce qui est appelé un empilement "ordonné" (comme dans le cas de l'illite), (ii) il peut y avoir un ordre partiel dans l'empilement des feuillets, ce qui est appelé un empilement "semi-ordonné" (comme dans le cas de la vermiculite, de la saponite, etc.), ou (iii) il peut ne pas y avoir de régularité dans l'empilement des feuillets, ce qui est appelé une "stratification turbulente" (par exemple, le minéral intercalaire illite/montmorillonite).

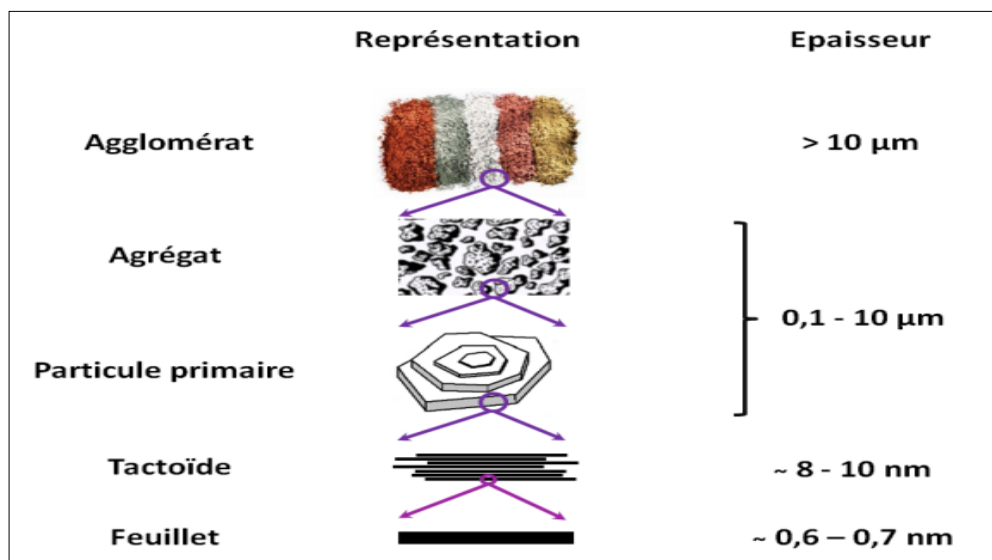


Figure 20. Représentation multi-échelle d'une argile.

13 La minéralogie d'argile

C'est l'étude des minéraux présents dans les argiles. Les argiles sont des matériaux fins et granulaires qui se forment à partir de la décomposition des roches et qui sont principalement composés de minéraux argileux. Les minéraux d'argile les plus couramment rencontrés comprennent la kaolinite, la montmorillonite, l'illite, le chlorite et la Smectites.

L'analyse et la caractérisation des minéraux d'argile impliquent souvent l'utilisation de diverses techniques telles que la diffraction des rayons X, la spectroscopie infrarouge, la microscopie électronique à balayage

et d'autres méthodes instrumentales. Ces techniques permettent d'identifier et de quantifier les minéraux d'argile présents, ainsi que d'étudier leur structure cristalline, leurs propriétés physiques et chimiques, et leur réactivité dans différents environnements géologiques et géochimiques.

La minéralogie des argiles revêt une grande importance dans de nombreux domaines, notamment la géologie, la pétrologie, la géochimie, la science du sol, l'ingénierie des matériaux et la recherche environnementale. Comprendre la composition et les propriétés des minéraux d'argile est essentiel pour interpréter les processus géologiques, les interactions sol-eau, les échanges d'ions, les phénomènes d'adsorption et de rétention des nutriments, ainsi que pour développer des applications industrielles telles que les matériaux de construction, les catalyseurs, les adsorbants et les géosynthétiques.

14 Propriétés physicochimiques des argiles

14.1 Degré d'hydratation :

Le degré d'hydratation des minéraux argileux fait référence à leur capacité à incorporer des molécules d'eau dans leur structure. Cette eau modifie les dimensions de l'espace inter foliaire, entraînant ainsi un gonflement.

14.2 Capacité d'échange cationique (CEC) :

La capacité d'échange cationique (CEC) est définie comme le nombre de cations monovalents pouvant être échangés avec les cations compensateurs pour équilibrer la charge électrique de 100 grammes de minéral calciné. La CEC est exprimée en milliéquivalents pour 100 grammes d'argile calcinée. [49]

14.3 Charge des surfaces argileuses :

La charge des surfaces argileuses varie en fonction de la structure des feuillets. Dans le cas de la kaolinite, le feuillet est toujours neutre, ce qui se traduit par une capacité d'échange cationique très faible. En revanche, pour les Smectites, le feuillet est chargé négativement, ce qui entraîne une capacité d'échange cationique élevée. Quant à l'illite, le feuillet présente également une charge négative, mais celle-ci est plus élevée que celle des smectites. Cependant, la capacité d'échange cationique de l'illite reste faible. [73]

15 Les différentes caractéristiques des argiles

15.1 Caractéristiques minéralogique des argiles

Les argiles sont des minéraux argileux qui se caractérisent par plusieurs propriétés minéralogiques distinctives. Ces caractéristiques minéralogiques confèrent aux argiles des propriétés uniques et les rendent utiles dans de nombreux domaines. Les argiles trouvent une utilité dans divers domaines tels que l'agriculture, la construction, la céramique, l'industrie pétrolière et bien d'autres encore.

15.1.1 Composition chimique :

Les argiles sont principalement composées de minéraux silicates alumineux. Les minéraux couramment trouvés dans les argiles comprennent la montmorillonite, la kaolinite, l'illite, le chlorite et la Smectites. La composition chimique de ces minéraux peut varier en fonction du type spécifique d'argile.

15.1.2 Structure cristalline :

Les argiles possèdent une structure cristalline qui se présente sous forme de couches ou de feuillets. Ces feuillets sont composés de tétraèdres de silice (SiO_4) et d'octaèdres d'alumine (AlO_6) qui se lient ensemble pour former des structures en couches superposées.

15.1.3 Propriétés d'échange d'ions :

Les argiles présentent une capacité d'échange d'ions, ce qui signifie qu'elles peuvent adsorber et libérer des ions. Les ions positifs, tels que les ions sodium (Na^+), les ions calcium (Ca^{2+}), les ions potassium (K^+), peuvent être piégés dans les espaces inter foliaires des argiles et être échangés avec d'autres ions présents dans leur environnement.

15.1.4 Plasticité :

Les argiles ont une plasticité élevée, ce qui signifie qu'elles peuvent être déformées sans se rompre. Cette propriété est due à la structure en feuillets des argiles et à leur capacité d'absorption d'eau, permettant ainsi aux feuillets de glisser les uns sur les autres.

15.1.5 Absorption d'eau :

Les argiles possèdent une remarquable capacité d'absorption d'eau. Les feuillets des argiles peuvent absorber de l'eau entre eux, ce qui entraîne une expansion des argiles. Cette propriété est utilisée dans diverses applications, telles que les matériaux d'étanchéité et les produits cosmétiques.

Parmi les minéraux argileux les plus couramment rencontrés, on retrouve la montmorillonite, la kaolinite et l'illite. Chacun présente des propriétés et des caractéristiques minéralogiques spécifiques qui les rendent utiles dans différentes applications industrielles, géotechniques et géologiques.

Ce sont des minéraux argileux qui possèdent des caractéristiques minéralogiques distinctives.

Montmorillonite : est un minéral argileux du groupe des smectites. Elle se distingue par sa structure en feuillets empilés, sa capacité d'absorption d'eau élevée et sa grande plasticité. Sa composition chimique comprend des tétraèdres de silice (SiO_4) et des octaèdres d'alumine (AlO_6). Des ions d'échange, tels que les ions sodium (Na^+), calcium (Ca^{2+}) ou potassium (K^+), peuvent être présents dans les espaces inter foliaires. Pour en savoir plus sur la montmorillonite [42]

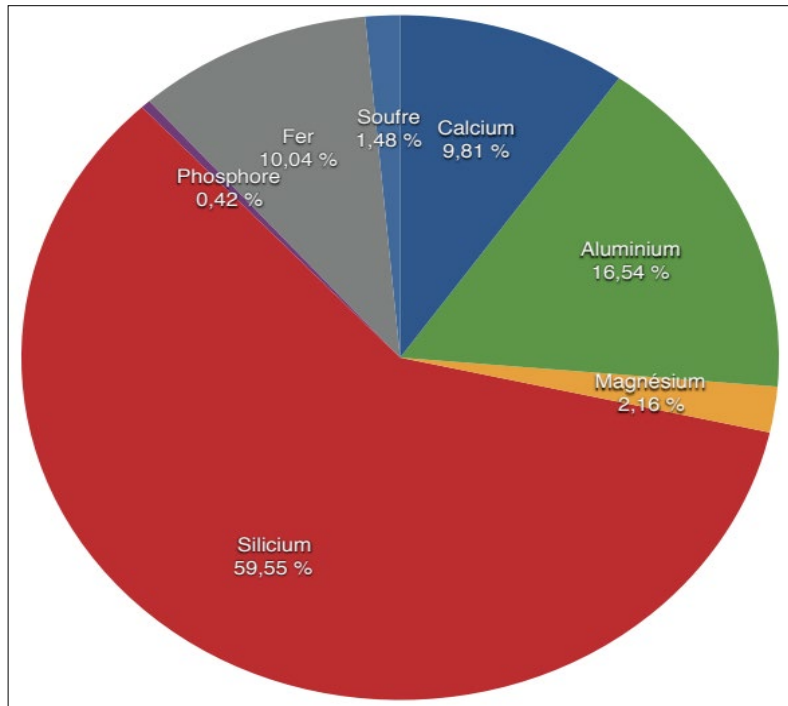


Figure 21. Analyse chimique d'argile verte type Montmorillonite. [7]

Kaolinite : La kaolinite est un minéral argileux du groupe des kaolins. Elle présente une structure en feuillets plus compacte que celle de la montmorillonite. La kaolinite possède une capacité d'absorption d'eau relativement faible et une plasticité limitée. Sa composition chimique comprend des tétraèdres de silice (SiO_4) et des octaèdres d'alumine (AlO_6). Contrairement à la montmorillonite, la kaolinite ne contient généralement pas d'ions d'échange significatifs. Pour approfondir vos connaissances sur la kaolinite. [43]

Illite : L'illite est un minéral argileux appartenant au groupe des micas. Il présente une structure en feuillets empilés similaire à celle de la montmorillonite. Sa composition comprend des tétraèdres de silice (SiO_4), des octaèdres d'alumine (AlO_6) et des feuillets de tétraèdres d'alumine ($\text{AlO}_4(\text{OH})_8$). Des ions d'échange, notamment les ions potassium (K^+), peuvent être présents dans les espaces inter foliaires. Pour une étude plus détaillée de l'illite. [44]

15.2 Caractéristiques physiques des argiles

Les argiles sont des minéraux d'argile composés principalement de silicate d'aluminium hydraté. Elles présentent plusieurs caractéristiques physiques distinctives :

15.2.1 Structure en feuillets :

Les argiles se composent de particules fines en forme de plaques ou de feuillets qui sont empilés les uns sur les autres et peuvent être séparés par des molécules d'eau.

15.2.2 Taille des particules :

Les particules d'argile sont très petites, avec une taille inférieure à 2 micromètres. Elles sont donc considérées comme des particules fines.

15.2.3 Capacité d'absorption d'eau :

Les argiles possèdent une capacité d'absorption d'eau considérable. Elles sont capables d'absorber des quantités significatives d'eau, ce qui entraîne leur expansion et leur capacité à retenir l'eau dans leurs espaces interstitiels.

15.2.4 Plasticité :

Les argiles sont plastiques, c'est-à-dire qu'elles peuvent être déformées et modelées sans se rompre. Cette propriété est attribuée à la présence de minéraux argileux particuliers, tels que la montmorillonite et la kaolinite.

15.2.5 Rétrécissement et gonflement :

Du fait de leur aptitude à absorber l'eau, les argiles ont tendance à se contracter en séchant et à se dilater en absorbant de l'eau. Ce phénomène peut causer des problèmes dans la construction, tels que des fissures dans les fondations.

15.2.6 Cohésion :

Les argiles présentent une cohésion élevée, ce qui signifie qu'elles ont une forte capacité à se lier entre elles. Cela leur confère une résistance mécanique et les rend appropriées pour des utilisations telles que la fabrication de briques et de céramiques.

15.2.7 Faible perméabilité :

Les argiles ont une faible perméabilité à l'eau en raison de leur structure en feuillets et de leur forte cohésion. Elles agissent donc comme une barrière naturelle pour le mouvement de l'eau et sont utilisées comme matériaux d'étanchéité dans les barrages et les bassins de rétention.

Ces caractéristiques physiques confèrent aux argiles des propriétés uniques qui leur permettent d'être utilisées dans divers domaines tels que la construction, la géologie, la poterie et l'industrie chimique. Leur large gamme d'applications en fait des matériaux polyvalents et indispensables.

15.3 Caractéristiques mécaniques des argiles

Les caractéristiques mécaniques des argiles peuvent varier en fonction de leur composition, de leur teneur en eau et d'autres facteurs.

15.3.1 Plasticité :

Les argiles sont généralement très plastiques, ce qui signifie qu'elles peuvent être déformées facilement sans se rompre. Elles peuvent être façonnées et moulées lorsque leur teneur en eau est suffisamment élevée.

15.3.2 Cohésion :

Les argiles présentent une certaine cohésion, c'est-à-dire une résistance interne qui permet aux particules d'argile de rester ensemble. La cohésion est influencée par des forces électrostatiques et d'attraction entre les particules d'argile.

15.3.3 Résistance à la compression :

Les argiles ont généralement une faible résistance à la compression non confinée, c'est-à-dire leur capacité à résister aux forces de compression sans confinement. La résistance à la compression augmente en fonction de la densité de l'argile, de sa teneur en eau et d'autres facteurs tels que la présence de minéraux.

15.3.4 Résistance au cisaillement :

Les argiles peuvent présenter une résistance significative au cisaillement, c'est-à-dire leur capacité à résister aux forces de cisaillement qui tendent à les déformer. La résistance au cisaillement des argiles dépend de nombreux facteurs, y compris la composition minéralogique, la structure des particules d'argile, la pression interstitielle et la teneur en eau.

15.3.5 Compressibilité :

Les argiles sont souvent considérées comme des sols compressibles, ce qui signifie qu'elles peuvent subir une déformation volumétrique importante sous l'effet d'une charge appliquée. Cette compressibilité est principalement attribuée à la présence de pores dans la structure de l'argile et à sa capacité d'absorption d'eau.

Il est important de souligner que les propriétés mécaniques des argiles peuvent présenter des variations significatives d'un type d'argile à un autre, voire au sein du même type d'argile, en fonction de sa composition et de son histoire géologique.

15.4 Caractéristiques hydrauliques des argiles

Les caractéristiques hydrauliques des argiles sont essentielles pour comprendre leur comportement en termes de perméabilité et de mouvement de l'eau à travers leur structure.

15.4.1 Perméabilité :

Les argiles sont généralement considérées comme des sols à faible perméabilité, ce qui signifie qu'elles offrent une résistance significative au mouvement de l'eau à travers leur structure. Cela est dû à leur faible porosité et à leur arrangement serré de particules. La perméabilité des argiles peut varier considérablement en fonction de leur compacité, de leur teneur en eau et de leur minéralogie.

15.4.2 Capacité de rétention d'eau :

Les argiles ont une grande capacité à retenir l'eau en raison de leur forte capacité d'adsorption. Les particules d'argile possèdent une charge électrique qui attire et retient les molécules d'eau. Cela conduit à une faible conductivité hydraulique et à une lente évaporation de l'eau des argiles.

15.4.3 Gonflement et retrait :

Les argiles sont capables de subir des variations de volume en fonction de leur teneur en eau. L'absorption d'eau par les minéraux d'argile provoque leur dilatation, ce qui peut entraîner une augmentation du volume des argiles et exercer une pression sur les structures environnantes. Lorsque les argiles se dessèchent, elles se rétractent, ce qui peut entraîner des fissures et des déformations.

15.4.4 Courbe de retrait :

La courbe de retrait est un graphique qui représente la variation de la teneur en eau des argiles en fonction de leur teneur en humidité. Elle illustre les relations entre le contenu volumétrique d'eau et le potentiel hydrique des argiles, montrant ainsi leur comportement de retrait lorsqu'ils perdent de l'eau.

15.4.5 Potentiel hydrique :

Le potentiel hydrique est une mesure de l'énergie de l'eau dans les sols. En raison de leur capacité élevée de rétention d'eau, les argiles présentent un potentiel hydrique élevé. Ce potentiel hydrique influence la direction et la vitesse de déplacement de l'eau à travers les argiles.

Il est essentiel de souligner que les caractéristiques hydrauliques des argiles peuvent varier considérablement en fonction de leur composition minéralogique., de leur structure, de leur compacité et d'autres facteurs. Les études spécifiques sur des types d'argiles spécifiques peuvent fournir des références plus détaillées et précises sur leurs caractéristiques hydrauliques.

16 Les minéraux argileux

Les minéraux argileux se caractérisent par leur petite taille de particules et leur composition principalement composée de silicates d'aluminium hydratés. Leur formation résulte principalement de l'altération chimique des roches silicatées en présence d'eau et d'agents atmosphériques. Ce phénomène, connu sous le nom d'altération hydrothermale, implique la dissolution des minéraux préexistants, suivie de la précipitation de nouveaux minéraux argileux. [29] Les facteurs tels que la composition chimique des roches, la température, le pH et la durée de l'interaction entre les roches et l'eau jouent un rôle dans la formation spécifique des minéraux argileux. La montmorillonite, la kaolinite, l'illite et le chlorite sont parmi les minéraux argileux les plus fréquemment rencontrés.

Les minéraux argileux sont également importants pour l'agriculture, car ils peuvent améliorer la rétention d'eau et les propriétés physiques du sol, ce qui peut améliorer la croissance des plantes. Cependant, leur capacité à adsorber des contaminants peut également rendre les sols riches en minéraux argileux difficiles à nettoyer en cas de contamination.

Il existe une grande diversité de types de minéraux argileux., notamment la montmorillonite, la kaolinite et l'illite, qui ont des propriétés différentes et peuvent être utilisés pour des applications spécifiques en fonction de leurs caractéristiques.



Figure 24. Les minéraux argileux

16.1 Définitions des minéraux argileux

Le terme "argile" dérive du mot grec "Argilos" qui signifie blanc, en référence à la couleur souvent associée à ces minéraux. Les argiles sont généralement le produit de la décomposition des roches siliceuses, résultant d'une désagrégation physique et mécanique, suivie d'une altération chimique. [30] Selon Eslinger et Peaver, les argiles sont des particules de phyllosilicates dont le diamètre des grains est inférieur à deux micromètres. La fraction fine de l'argile ($< 2\mu\text{m}$) peut également contenir des minéraux non phyllosilicates tels que des carbonates, du quartz, des feldspaths, ainsi que des composés minéraux amorphes tels que des oxydes ou des hydroxydes de fer et d'aluminium. Ces minéraux non phyllosilicates sont considérés comme accessoires ou associés aux minéraux argileux. Les minéraux argileux se lient les uns aux autres de différentes manières, formant ainsi des agrégats de taille plus importante. [31]

16.2 La formation des minéraux argileux

C'est un processus complexe qui a été étudié en détail par les géologues et les chercheurs.

Les minéraux argileux sont généralement le résultat de processus d'altération hydrothermale ou d'altération météorique. L'altération hydrothermale se produit lorsque l'eau chaude réagit avec les roches à des températures élevées et des pressions élevées, tandis que l'altération météorique se produit à des températures et des pressions ambiantes. [32]

La formation des minéraux argileux est étroitement liée à la décomposition chimique des minéraux silicatés primaires tels que les feldspaths, les micas et les minéraux ferromagnésiens. Cette décomposition est principalement due à l'hydrolyse, où l'eau réagit avec les minéraux pour former de nouveaux minéraux.

L'eau joue un rôle crucial dans le processus de formation des minéraux argileux. En fournissant les ions nécessaires pour la réaction chimique. Lors de la dissolution des minéraux primaires, une variété d'ions sont libérés, tels que l'hydroxyde (OH^-), le silicate (SiO_4^-), l'aluminium (Al^{3+}), le magnésium (Mg^{2+}), le fer (Fe^{2+} et Fe^{3+}) et le potassium (K^+).

La réaction chimique entre les ions libérés et l'eau entraîne la formation de minéraux argileux. Par exemple, la kaolinite se forme lorsque l'aluminium est issu de la décomposition des feldspaths réagit avec l'eau et l'hydroxyde. La montmorillonite, un autre minéral argileux commun, se forme par la substitution d'ions dans une structure cristalline à feuillets.

La formation spécifique des minéraux argileux est influencée par des facteurs environnementaux tels que la température, le pH, la composition chimique de la roche d'origine et la durée de l'interaction entre l'eau et les minéraux. Par exemple, des températures élevées donnent la formation de minéraux argileux tels que la kaolinite, tandis que des températures plus basses donnent la formation de minéraux argileux tels que la montmorillonite. [33]

16.3 Minéraux argileux inter-stratifiés

Les minéraux argileux inter stratifiés sont des argiles caractérisées par une structure composée de feuillets alternant entre différents types de minéraux argileux. Cela représente une étape de transformation d'un minéral argileux à un autre. Parmi ces minéraux, on retrouve l'illite-smectite, la glauconite-smectite et la chlorite-vermiculite. Un exemple de minéral argileux inter stratifié est la ghassoulite, également connue sous les noms de ghassoul, rhassoul ou rassoul, dérivés du verbe arabe "rassala" qui signifie laver. Cette argile est considérée comme une cousine de la montmorillonite et se distingue par sa richesse en minéraux

tels que le silicium, le calcium, le potassium, le fer, le sodium et le magnésium, ce qui en fait un produit de qualité. Originnaire du Maroc, elle est largement utilisée dans les hammams en raison de ses nombreuses propriétés. Elle est disponible sous forme de morceaux, de pâte ou de fine poudre. [34]

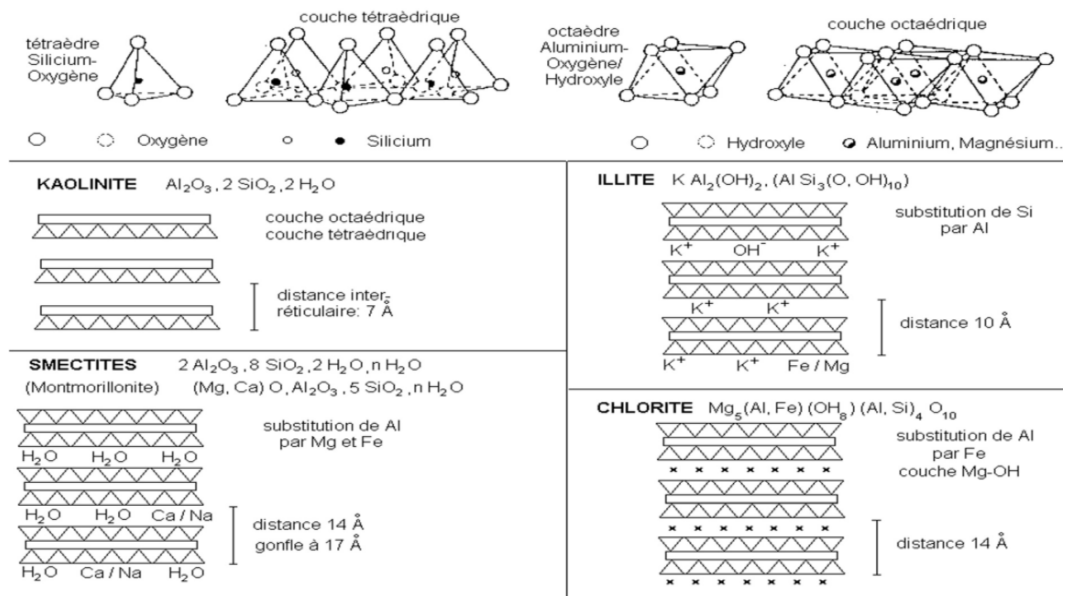


Figure 25. Structure des minéraux argileux

16.4 Classification des minéraux argileux

La classification des minéraux argileux repose généralement sur les critères suivants [35] :

- Charge globale du feuillet.
- Nature des cations inter foliaires.
- Type de feuillet.

Quelques critères secondaires comprennent le polytypisme (mode d'empilement des feuillets), la composition chimique, le type d'espèces argileuses et le mode d'empilement pour les espèces inter stratifiées régulières ou désordonnées [36, 37].

Il existe différentes classifications des argiles, dont la plus courante est basée sur l'épaisseur et la structure du feuillet. Ces classifications distinguent ainsi 4 groupes distincts [35].

16.4.1 Minéraux à 7 Å :

Les minéraux à 7 Å sont caractérisés par un feuillet constitué d'une couche tétraédrique et d'une couche octaédrique. Ce type de feuillet est qualifié de T : O ou de type 1 : 1. Son épaisseur est d'environ 7 Å, ce qui correspond au groupe de la kaolinite.

16.4.2 Minéraux à 10 Å :

Les minéraux à 10 Å sont caractérisés par un feuillet constitué de deux couches tétraédriques et d'une couche octaédrique. Ce type de feuillet est qualifié de T : O : T ou de type 2:1. Son épaisseur est d'environ 10 Å.

Pour ce type de minéraux, on distingue deux grandes familles, à savoir l'illite et les smectites.

16.4.3 Minéraux à 14 Å :

Les minéraux à 14 Å sont caractérisés par un feuillet constitué de l'alternance de feuillets T : O : T et de couches octaédriques inter foliaires. Leur épaisseur est d'environ 14 Å. La famille des chlorites est associée à ce type de minéraux.

16.4.4 Minéraux inter stratifiés :

Les minéraux inter stratifiés sont caractérisés par une épaisseur variable du feuillet. Ils résultent du mélange régulier ou irrégulier d'argiles appartenant aux groupes mentionnés précédemment. La valeur de la charge permanente du feuillet a été utilisée comme critère pour établir une classification des phyllosilicates 2 : 1 (T : O : T). Cette classification est basée sur les travaux de McKenzie (1975) et Brindley (1996). [39].

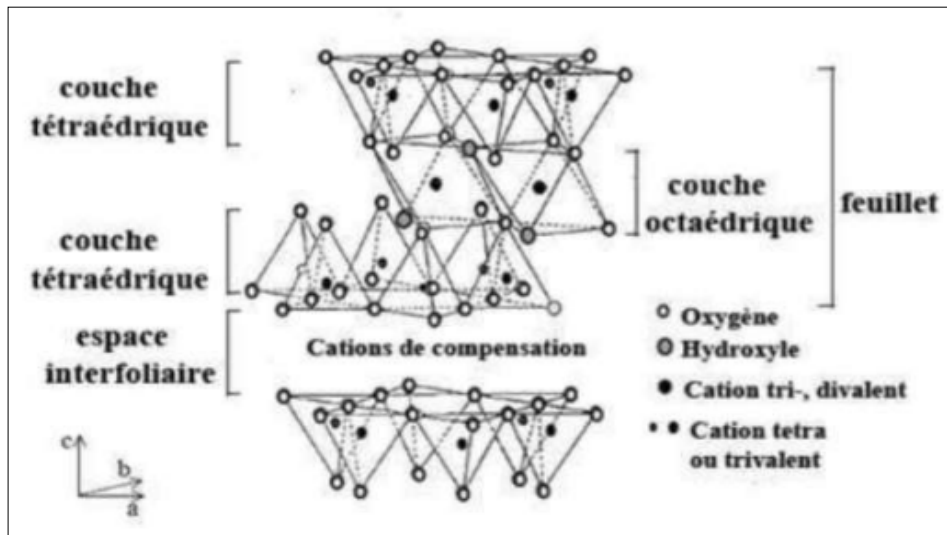


Figure 26. Feuillet de type 2 : 1 [35]

Groupe de minéraux Argileux	Espèce Minérale	Structure T=couche de tétraèdres O=couche d'octaèdres
Kaolinite	Kaolinite Halloysite Dickite	Minéraux à 2 couches T:O T:O
Smectites Illite Vermicule Micas	Montmorillonite Saponite Beidellite Nontronite Illite Vermicule Muscovite Biotite	Minéraux à 3 couches T:O:T T:O:T
Chlorites	Chlorites	Minéraux à 4 couches T:O:T:O T:O:T:O

Tableau : Classification des principaux groupes de minéraux argileux et de leurs espèces [40]

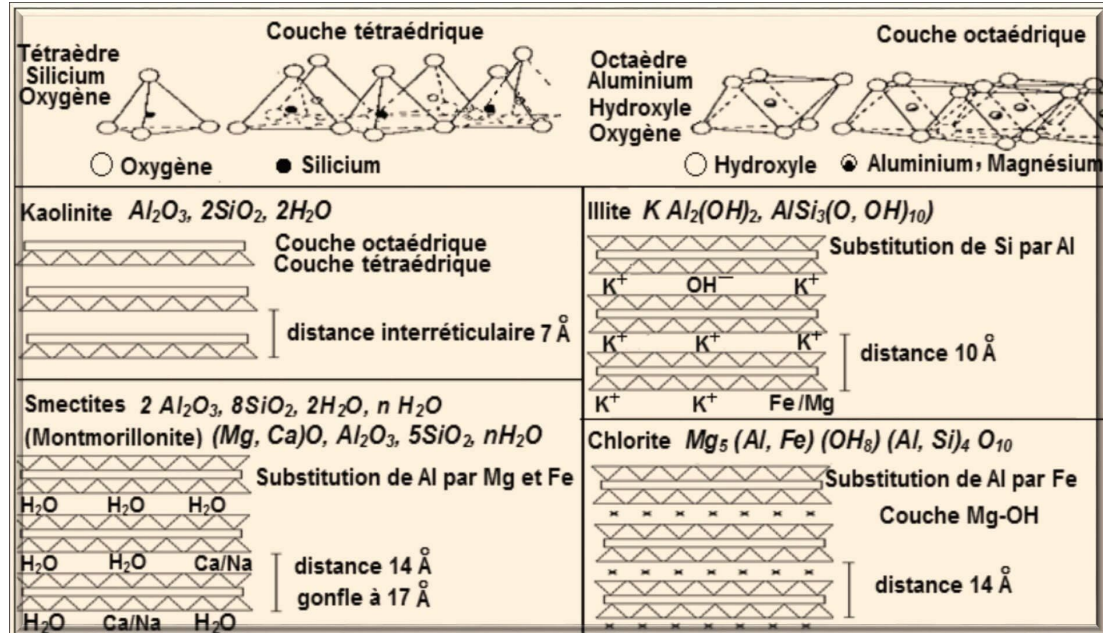


Figure 27. la classification des minéraux argileux

16.5 Rôle des minéraux argileux

Les minéraux argileux ont un rôle crucial dans les processus liés à l'argile. Ils sont utilisés pour la stabilisation des sols et l'amélioration de la qualité de l'eau. Dans le domaine de l'argile, ils sont employés afin d'améliorer la qualité du produit final en renforçant sa structure et sa résistance.

Les minéraux argileux permettent également d'absorber les toxines et les polluants présents dans l'environnement. Cela contribue à maintenir un environnement sain et durable pour les générations futures. Dans l'Agile, cela se traduit par une approche responsable et durable qui prend en compte les impacts environnementaux de chaque étape du processus.

Les minéraux argileux jouent plusieurs rôles importants dans divers domaines :

16.5.1 Rôle dans les sols :

Les minéraux argileux contribuent à la fertilité des sols en retenant les éléments nutritifs, tels que les ions ammonium, potassium et calcium, dans leurs structures cristallines. Ils sont également fournis comme des échangeurs d'ions, libérant ces éléments nutritifs pour les rendre disponibles aux plantes. De plus, les minéraux argileux permettent la rétention d'eau dans les sols, favorisant ainsi la disponibilité d'eau pour les plantes.

16.5.2 Rôle dans l'ingénierie géotechnique :

Les minéraux argileux ont un impact significatif sur le comportement des sols dans le domaine de l'ingénierie géotechnique. Leur plasticité élevée les rend aptes à subir des déformations, ce qui peut influencer la stabilité des structures construites sur des sols argileux. De plus, les minéraux argileux peuvent subir des variations de volume en raison des changements de teneur en eau, ce qui peut entraîner des mouvements de terrain, des fissures et des déformations.

16.5.3 Rôle dans l'environnement :

Les minéraux argileux ont des capacités d'adsorption élevées, ce qui leur permet de piéger et de retenir les substances indésirables dans l'environnement, telles que les polluants chimiques et les métaux lourds. Leur contribution est essentielle dans le processus de détoxification et de décontamination des sols. De plus, les minéraux argileux interagissent avec l'eau souterraine, influençant les flux hydriques et les processus d'épuration naturelle.

16.5.4 Rôle dans les matériaux de construction :

Les minéraux argileux sont employés dans la production de divers matériaux de construction tels que les briques, les tuiles et la céramique. Leur plasticité leur permet d'être façonnés et moulés avant d'être cuits pour obtenir des produits finis solides et durables.

16.5.5 Rôle dans l'industrie pétrolière :

Les minéraux argileux, en particulier les argiles expansives, jouent un rôle important dans l'industrie. Ils sont utilisés dans les boues de forage pour maintenir la stabilité des parois de puits en prévenant les éboulements et les fuites.

Il est important de noter que le rôle des minéraux argileux peut varier en fonction de leur composition spécifique et de leurs propriétés particulières. Différents types de minéraux argileux ont des caractéristiques uniques qui influencent leur utilisation et leur impact dans divers domaines.

16.6 Propriétés des minéraux argileux

Les minéraux argileux se distinguent des autres minéraux grâce à diverses propriétés spécifiques qui leur sont propres.

16.6.1 Structure en feuillets :

Les minéraux argileux ont une structure en feuillets, ce qui signifie qu'ils se composent de couches empilées de hachis cristaux en forme de feuilles. Ces feuillets sont formés par des arrangements spécifiques d'atomes et d'ions, ce qui comporte aux minéraux argileux leur caractère en feuillets.

16.6.2 Taille des particules :

Les minéraux argileux se caractérisent par leur dimension réduite de particules, qui varie de quelques micromètres à quelques dizaines de micromètres. Cette petite taille de particules contribue à leurs propriétés uniques, telles que la plasticité et l'activité de surface élevées.

16.6.3 Plasticité :

Les minéraux argileux sont connus pour leur plasticité, c'est-à-dire leur capacité à être déformés sans se rompre. Lorsqu'ils sont mélangés avec de l'eau, les minéraux argileux peuvent être façonnés et moulés en différentes formes. Cette plasticité est due à la structure en feuillets et aux interactions électrostatiques entre les particules d'argile et les molécules d'eau.

16.6.4 Gonflement et rétractation :

Certains minéraux argileux, tels que les Smectites, présentent une propriété de gonflement et de rétractation en réponse aux variations de leur teneur en eau. Lorsqu'ils absorbent de l'eau, les feuillets de minéraux argileux s'écartent, entraînant une expansion volumétrique. Lorsqu'ils se dessèchent, les feuillets se rapprochent, provoquant une rétractation.

16.6.5 Capacité d'adsorption :

Les minéraux argileux ont une capacité élevée d'adsorption, ce qui signifie qu'ils peuvent retenir et piéger des substances dans leurs structures. Cela inclut les ions, les molécules organiques et même les polluants présents dans l'environnement. La capacité d'adsorption des minéraux argileux est fournie par leur surface spécifique élevée et leurs charges électriques.

L'adsorption est une méthode extrêmement efficace pour éliminer les polluants dilués, offrant des voies de régénération, de restauration et de réutilisation des matériaux adsorbants [39]. La technologie d'adsorption est largement reconnue comme étant une méthode très efficace et éprouvée pour le traitement de l'eau et des eaux usées, offrant un potentiel d'application considérable [40]. De nombreuses études ont été menées sur l'adsorption sur argile [41].

16.6.6 Échange d'ions :

Les minéraux argileux ont des sites d'échange d'ions sur leurs surfaces, où des ions peuvent être retenus ou libérés. Cela permet aux minéraux argileux d'échanger des cations et d'influencer les propriétés chimiques et physiques du milieu environnant.

16.6.7 Sensibilité à l'eau :

Les minéraux argileux réagissent aux fluctuations de la teneur en eau, ce qui les rend sensibles à l'eau. Cela peut entraîner des variations de volume, des déformations et des mouvements dans les sols et les roches qui contiennent ces minéraux argileux.

Il convient de souligner que les propriétés des minéraux argileux peuvent varier en fonction de leur composition chimique, de leur structure cristalline et de leur arrangement structural. Il existe différents types de minéraux argileux.

16.7 Propriétés physiques des minéraux argileux

Les minéraux argileux ont une faible densité et une porosité élevée, ce qui les rend utiles pour la filtration de l'eau et la rétention d'humidité dans les sols.

Grâce à leur grande surface spécifique, les minéraux argileux peuvent être utilisés comme adsorbants pour la purification de l'eau et la décontamination des sols pollués.

16.8 Propriétés chimiques des minéraux argileux

Les minéraux argileux présentent des propriétés ioniques qui leur confèrent la capacité d'échanger des ions avec leur environnement. Cette capacité est utilisée dans l'industrie pour la purification de l'eau et la fabrication de catalyseurs.

De plus, les minéraux argileux présentent des propriétés de rétention d'eau et de nutriments, ce qui les rend précieux pour l'agriculture et la production de fertilisants.

16.9 Propriétés mécaniques des minéraux argileux

Les minéraux argileux ont des propriétés de plasticité et de cohésion, ce qui les rend utiles pour la fabrication de céramiques, de briques et de matériaux de construction.

Ils ont également des propriétés de lubrification et de réduction de friction, ce qui les rend utiles pour la production de lubrifiants industriels et de revêtements antiadhésifs.

16.10 Propriétés électromagnétiques des minéraux argileux

Les minéraux argileux exhibent des propriétés de conductivité électrique et de magnétisme, ce qui les rend précieux dans la fabrication de composants électroniques et de dispositifs magnétiques.

En outre, ils présentent des propriétés de piézoélectricité, ce qui les rend précieux dans la production de capteurs et de transducteurs.

16.11 Conclusion

Les propriétés des minéraux argileux sont variées et importantes pour de nombreuses applications industrielles. Leur capacité à échanger des ions, à retenir l'eau et les nutriments, ainsi que leur plasticité et leur conductivité électrique en font des matériaux polyvalents.

Cependant, leur disponibilité limitée et leur coût élevé peuvent limiter leur utilisation dans certaines applications. Cela souligne l'importance de la recherche continue sur les minéraux argileux et leur utilisation potentielle dans de nouvelles applications industrielles.

Chapitre 02 : Généralités sur les ajouts

17 Généralités sur ajouts

17.1 LE VERRE

17.1.1 Histoire du verre

Le verre existait déjà avant que les humains ne maîtrisent sa fabrication. Il a été utilisé pour la première fois il y a environ 100 000 ans, servant à la création d'outils, d'armes et de bijoux. Les verres terrestres les plus anciens, d'origine volcanique, sont appelés obsidiennes et sont restés sous forme de verre depuis environ 75 millions d'années [50].

La fabrication du verre par l'homme a commencé beaucoup plus tard, pendant le Vème millénaire avant J.C., principalement en Mésopotamie, en Syrie et en Égypte. À cette époque, il était utilisé sous forme de glaçure, une couche vitrifiable appliquée à la surface de la céramique. Ces glaçures étaient opaques et pouvaient être colorées en vert ou en bleu. Il faudra attendre l'apparition des premiers fours, qui permettent d'atteindre des températures plus élevées et d'affiner la matière, pour que le verre transparent fasse son apparition. À cette époque, le verre reste encore un matériau rare et précieux. Vers 1500 avant J.C., l'émail, une substance vitreuse incolore, est utilisé par les verriers pour appliquer des couleurs sur la poterie. C'est à cette période qu'apparaissent les premiers objets en verre à usage utilitaire, tels que les bouteilles et les gobelets, en Égypte.

La technique du soufflage du verre est généralement attribuée aux Babyloniens au IIIe siècle avant J.C., grâce à l'invention de la canne à souffler. Cet outil révolutionnaire facilite la fabrication du verre et permet de démocratiser son utilisation en tant que récipient. Cette méthode se répand dans toute la Méditerranée, incluant l'Empire romain, la Gaule, la Phénicie, etc., avant de conquérir toute l'Europe. Les premières vitres apparaissent autour du premier siècle avant J.C., mais elles étaient alors encore opaques car elles étaient composées de soude.

Durant le Moyen Âge, le verre était principalement utilisé pour la création de vitraux. En raison du déclin des échanges commerciaux avec l'Orient, les fabricants européens ont dû apprendre de manière empirique à utiliser du sable de moindre qualité. Cependant, cette situation commença à changer à l'approche de la Renaissance. À partir du XVème siècle et pendant deux siècles, Venise devint le leader du marché verrier en Europe. Au XVIIème siècle, grâce à l'impulsion de Colbert, la France prit la tête de l'industrie verrière européenne, notamment avec la création de Saint-Gobain et de la manufacture royale des glaces de miroirs. À la fin du XVIIIème siècle, la chimie joua un rôle prépondérant dans une révolution industrielle du secteur verrier.

Ce n'est qu'au XX^e siècle que l'on observe une incroyable explosion de la production scientifique liée au développement de procédés de synthèse de nouveaux verres et de traitements thermiques et chimiques. Cela a insufflé une nouvelle vie à l'utilisation des verres. Leurs propriétés mécaniques et optiques ont été largement étudiées et exploitées, notamment dans des domaines tels que les écrans tactiles et les technologies de communication. De nos jours, les verres sont devenus des matériaux extrêmement courants dans la vie quotidienne, même si les mécanismes responsables de leurs comportements ne sont pas encore pleinement compris, voire suscitent des débats controversés.

17.1.2 Définition du verre

Le verre est un matériau solide, amorphe et transparent, principalement composé de silice (SiO_2) et de divers oxydes métalliques. Selon l'Encyclopédie Britannica, le verre est fabriqué en chauffant un mélange de matières premières, telles que du sable de silice, de la soude (carbonate de sodium) et de la chaux (oxyde de calcium), à des températures élevées jusqu'à ce qu'il fonde. Une fois fondu, le matériau est refroidi rapidement pour former une substance vitreuse solide. [51]

Avant le xx^e, les verres silicatés, connus sous le nom de verres sodocalciques, étaient essentiellement les seuls matériaux transparents qui pouvaient être produits à grande échelle. Même aujourd'hui, ils restent les types de verre les plus couramment fabriqués en grande quantité, notamment pour les vitrages, la vaisselle et la verrerie de laboratoire. Cette définition englobe toute la symbolique de transparence associée au verre, comme l'indique la référence [52].

En termes plus généraux, on entend par cette définition le fait qu'un solide non cristallin subisse une transition vitreuse. Cette définition, établie par Jerzy Zarzycki [53] [54], est celle qui est actuellement largement acceptée par la communauté scientifique.

En règle générale, les verres sont créés en refroidissant rapidement un liquide afin d'empêcher sa cristallisation. Pour certains matériaux, appelés "vitrifiables", une vitesse de refroidissement de quelques degrés par minute est suffisante, tandis que d'autres nécessitent une vitesse dépassant le milliard de degrés par seconde [55]. Il est également possible de former des verres en déposant de la vapeur sur un substrat froid [56].

17.1.3 Structure du verre

La structure du verre est un sujet complexe et en constante évolution dans la recherche scientifique. Les modèles et théories sur la structure du verre varient selon les auteurs et les approches. [57]

La structure du verre est amorphe, ce qui signifie qu'elle n'a pas d'ordre à longue portée ou de motifs de répétition régulière comme on le trouve dans les cristaux. Au niveau atomique, la structure du verre est désordonnée et chaotique, ce qui possède au matériau ses propriétés particulières.

Dans un réseau de verre, les atomes sont arrangés de manière aléatoire, formant des liaisons chimiques avec leurs voisins proches. Les principales composantes du verre sont la silice (dioxyde de silicium, SiO_2) et d'autres oxydes métalliques tels que la soude (Na_2O), la chaux (CaO) et l'alumine (Al_2O_3), qui sont ajoutées pour modifier les propriétés du verre.

On la décrit fréquemment comme une structure en réseau tridimensionnel composée de tétraèdres de silice (SiO_4), où chaque atome de silicium est entouré de quatre atomes d'oxygène. Les oxydes métalliques ajoutés se substituent aux atomes de silicium ou forment des liaisons avec eux, ce qui influence les propriétés du verre.

En raison de son caractère amorphe, le verre peut être modelé, chauffé, refroidi et façonné dans une variété de formes tout en conservant sa structure fondamentale. Cette caractéristique offre de nombreuses possibilités d'utilisation dans divers secteurs tels que la construction, l'emballage, l'électronique et la création d'objets en verre artistique.



Figure 28. Poudre du verre

17.1.4 Principaux composants du verre

Du fait de sa structure amorphe, le verre n'est soumis à que très peu de contraintes stœchiométriques. Par conséquent, il peut contenir une vaste gamme d'éléments et présenter des compositions extrêmement complexes.

Dans un verre d'oxydes, les divers éléments se présentent sous forme cationique, s'associant à l'anion oxygène O^{2-} pour former des oxydes.

Dans le cas des verres non-oxydes tels que les chalcogénures et les verres métalliques, la distinction entre formateurs et modificateurs de réseau n'est pas applicable. Il est possible de créer des verres à partir d'un seul élément, tels que le verre de soufre ou le verre de sélénium, qui sont les seuls éléments connus capables de former un verre à eux seuls. Par conséquent, ces éléments ne peuvent être classés comme formateurs ou modificateurs. Une multitude de verres de chalcogénures peuvent être créés, tels que le germanium-sélénium, l'arsenic-sélénium et le tellure-arsenic-sélénium [58].

17.1.5 Utilisation du verre

Dans le domaine de l'architecture, le verre est un matériau de construction extrêmement significatif. En plus des vitrages en verre flotté traditionnels utilisés depuis le milieu du XX^e siècle, les briques de verre, qui existent depuis environ un siècle, permettent de créer des parois translucides tant horizontales que verticales. Ces briques de verre trouvent leur origine dans les dalles carrées en verre de l'Antiquité [59].

Les guides optiques à base de silice présentes dans les fibres de verre jouent un rôle crucial dans les ouvrages d'art contemporains en permettant le transfert d'informations provenant de divers capteurs. Cette technologie assure une surveillance continue des ouvrages [60]. Les entreprises spécialisées dans la fabrication de verre anticipent de nombreuses possibilités d'applications futures pour cette innovation [61].

17.1.6 Influence du verre sur l'argile

Le verre peut avoir une influence significative sur l'argile lorsqu'il est utilisé dans des contextes tels que la céramique ou la poterie.

17.1.6.1 Glaçure :

Dans le domaine de la céramique, le verre est fréquemment utilisé pour créer des glaçures. Une glaçure consiste en une couche de verre fondu appliquée sur la surface de l'argile, puis cuite à une température élevée. Lorsque le verre fond, il forme une couche lisse et brillante qui ajoute une finition esthétique à l'argile tout en la rendant imperméable à l'eau.

17.1.6.2 Inclusions :

Il est possible d'ajouter des morceaux de verre à l'argile pour créer des inclusions. Lorsque l'argile est cuite, le verre fondu se mélange à l'argile environnante, formant des motifs colorés et texturés. Les inclusions de verre peuvent apporter un intérêt visuel et une complexité supplémentaires à l'argile une fois finie.

17.1.6.3 Stabilisation :

L'incorporation de verre dans l'argile peut contribuer à stabiliser sa structure pendant la cuisson. Le verre fondu se lie aux particules d'argile et agit comme un agent de liaison, aidant à prévenir le retrait excessif et les fissures pendant le processus de cuisson.

17.1.6.4 Effets de texture :

Quand on chauffe l'argile et le verre à des températures élevées ensemble, le verre à la capacité de fondre partiellement et de se mêler à l'argile, permet ainsi des textures uniques. Ces textures sont fournies par la composition chimique du verre et de l'argile, ainsi que par les conditions de cuisson utilisées. Il est important de noter que les techniques et les effets spécifiques varient en fonction de la méthode et de l'objectif d'utilisation du verre avec l'argile. Différents types de verre, tels que le verre fondu, le verre concassé ou le verre en poudre, peuvent être utilisés pour obtenir des résultats variés.

17.2 Caoutchouc

17.2.1 Définition de Caoutchouc

Le caoutchouc, qui se compose principalement de polymères organiques, est un matériau élastique, résistant et imperméable. Il peut être soit d'origine naturelle, soit synthétique. Le caoutchouc naturel est principalement obtenu à partir de la sève de l'hévéa basiliens, un arbre qui trouve son origine en Amazonie. La sève, connue sous le nom de latex, est obtenue en pratiquant des incisions sur le tronc de l'arbre. Ce latex contient des particules de caoutchouc, des protéines, de l'eau et d'autres composés.

Le caoutchouc naturel est apprécié pour sa grande élasticité, sa résistance à l'abrasion, sa flexibilité à basse température et son excellente étanchéité. Il est largement utilisé dans divers domaines, dont les pneumatiques, grâce à ses propriétés remarquables., les tuyaux, les courroies de transmission, les joints d'étanchéité, les gants chirurgicaux, les produits médicaux, les balles de sport, les semelles de chaussures et bien d'autres produits.

En plus du caoutchouc naturel, il existe des caoutchoucs synthétiques fabriqués à partir de polymères synthétiques tels que le chloroprène, le styrène-butadiène, le polyuréthane et la silicone. Ces caoutchoucs synthétiques sont créés par des procédés chimiques à partir de matières premières pétrolières ou autres. [62]

17.2.2 Origine de caoutchouc

L'usage de la sève d'arbres dans diverses cultures anciennes marque les origines du caoutchouc. Toutefois, la découverte et l'exploitation commerciale du caoutchouc naturel tel que nous le connaissons aujourd'hui sont étroitement liées à l'hévéa *brasiliensis*, un arbre originaire d'Amazonie.

Pendant des siècles, les peuples indigènes d'Amazonie ont utilisé la sève de l'hévéa, connue sous le nom de latex, pour la fabrication d'objets imperméables, de chaussures, de bouteilles et d'autres articles. Cependant, ce n'est qu'au début du XIXe siècle que le caoutchouc naturel a attiré l'attention à l'échelle internationale. [63]



Figure 31. Poudre de caoutchouc

17.2.3 L'histoire de Caoutchouc

L'histoire du caoutchouc remonte à plusieurs millénaires, mais son exploitation et son utilisation commerciale à grande échelle sont plus récentes. Avant la fin du XVème siècle, les Européens, suite aux Grandes découvertes, ont commencé à observer l'utilisation séculaire d'une substance inconnue en Europe par les populations autochtones d'Amérique centrale et d'Amérique du Sud. Les Amérindiens utilisaient le latex provenant de différentes plantes, comme l'hévéa et le guayule, pour fabriquer divers objets du quotidien. Ils utilisaient des moules en argile pour façonner des balles, des toiles enduites et des torches, qu'ils imperméabilisaient en les exposant à la fumée.

Les premiers explorateurs de l'Amérique devinrent également les premiers rapporteurs d'échantillons de caoutchouc en Europe. Cependant, en raison de certaines limitations, ces échantillons ont été relégués dans les « cabinets des curiosités » sans application pratique. En effet, le latex présentait plusieurs inconvénients :

- Il devenait collant lorsqu'il était exposé au soleil.
- Il fondait à des températures élevées.
- Il devenait cassant à basse température.
- Il produisait une teinte brunâtre et se coagulait lorsqu'il était exposé à l'air.

Charles Goodyear a fait une découverte majeure en 1839 en mettant au point le procédé de vulcanisation. Ce processus implique le traitement du caoutchouc avec du soufre et de la chaleur afin d'améliorer sa résistance et sa stabilité. La vulcanisation a considérablement élargi les possibilités d'utilisation du caoutchouc, conduisant à la fabrication de pneumatiques, de courroies, de joints d'étanchéité et d'autres produits.

Au XXe siècle, des recherches ont été entreprises pour développer des caoutchoucs synthétiques en remplacement du caoutchouc naturel. En 1909, Fritz Hofmann a réussi à mettre au point le premier caoutchouc synthétique à base de polymères de butadiène. Depuis lors, de nombreux autres types de caoutchoucs synthétiques, tels que le styrène-butadiène, le néoprène et le nitrile, ont été développés pour répondre à différentes applications [64].

17.2.4 Types de caoutchouc

17.2.4.1 Caoutchouc naturel

La production de caoutchouc naturel (NR) débute par une incision pratiquée dans l'écorce de l'arbre à caoutchouc, permettant au latex, une sève laiteuse, de s'écouler. Le latex, composé principalement d'eau et de polyisoprène, ainsi que de petites quantités de protéines et d'hydrocarbures, est collecté et coagulé dans des réservoirs en utilisant de l'acide formique. Ensuite, le coagulat est pressé à travers des rouleaux afin d'éliminer l'excès d'eau, puis il est soumis à un processus de séchage. Le produit final est ensuite emballé et auprès des fabricants de caoutchouc [65].

Le polyisoprène, aussi connu sous le nom de polyterpène, est composé de 1000 à 5000 unités isopréniques. Il présente d'excellentes propriétés élastiques et est utilisé dans la fabrication de ciments et d'adhésifs. À basse température, il se solidifie, tandis qu'il devient plus souple lorsque chauffé. Bien que le polyisoprène soit à la base du polymère, le caoutchouc naturel se décline en différentes catégories selon sa teneur en impuretés et la méthode de production employée. Parmi les catégories courantes de caoutchouc se trouvent

les feuilles nervurées fumées (RSS : Ribbed Smoked Sheet), ainsi que des types spécifiques tels que le SMR (Standard Malaysian Rubber) et le SIR (Standard Indonesian Rubber). [72]

Un autre type de matériau est le latex naturel, qui provient notamment de l'arbre *Hévéa brasiliensis*. Les principaux objectifs d'utilisation du latex sont d'assurer une adhérence et une imperméabilité lorsqu'il est appliqué en une fine couche sur une surface peu déformable, avec une faible déflexion. [65]

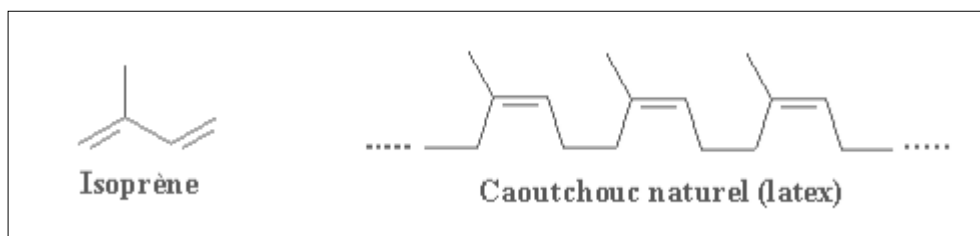


Figure 32. Molécule de caoutchouc naturel [17]

17.2.4.2 Caoutchouc synthétique

Caoutchouc styrène butadiène (SBR)

Les polymères SBR sont composés de styrène et de butadiène, et ils représentent plus la moitié de la production mondiale de caoutchouc synthétique. Comparé au caoutchouc naturel (NR), le SBR présente une résistance mécanique inférieure, ce qui nécessite l'ajout de charges de remplissage telles que le noir de carbone pour améliorer sa rigidité et sa résistance mécanique. Les autres propriétés chimiques du SBR sont similaires à celles du NR, bien que le SBR offre une meilleure résistance au vieillissement. Les coûts de production du SBR sont comparables à ceux du NR. [65]

Le polychloroprène (CR)

Le caoutchouc polychloroprène, également connu sous le nom de "Néoprène", est considéré comme un caoutchouc plus spécialisé par rapport aux types précédents. Il a été inventé en 1931 et présente une résistance moyenne à assez bonne vis-à-vis des huiles. Ses propriétés dynamiques sont similaires à celles du caoutchouc naturel (NR), surtout lorsqu'il est vulcanisé. Il offre une meilleure résistance aux solutions acides et basiques par rapport au NR et au SBR, mais il est plus coûteux. Il existe plusieurs variantes de ce type de caoutchouc utilisées dans diverses applications industrielles, notamment la fabrication de pneumatiques, de chambres à air et de tuyaux. [67] La figure illustre le modèle moléculaire du polychloroprène.

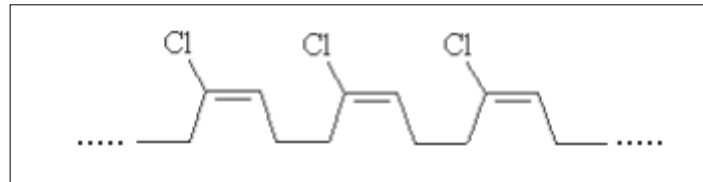


Figure 33. Molécule du polychloroprène

Le polybutadiène (BR)

Le caoutchouc butadiène (BR) est généralement combiné avec d'autres types de caoutchoucs, notamment le caoutchouc naturel (NR), pour faciliter sa fabrication en raison de sa faible polarité. Lorsqu'il est vulcanisé, le BR présente une excellente résilience et une grande résistance à l'abrasion, notamment lorsqu'il est utilisé en association avec d'autres caoutchoucs. Il conserve également une bonne flexibilité à basse température. Ces caractéristiques en font un matériau largement utilisé dans la production de pneus, de tuyaux et dans les copolymères de butadiène et de styrène.



Figure 34. Structure du monomère butadiène et de son polymère associé, le polybutadiène [65]

Le nitrile (NBR)

Le caoutchouc acrylonitrile butadiène, également connu sous le nom de NBR ou "Buna-N" dans l'industrie, est plus largement reconnu pour sa remarquable résistance aux huiles et aux produits pétroliers divers. Cette résistance est directement influencée par la teneur en acrylonitrile (ACN) présente dans les chaînes polymériques du matériau, ainsi que par leur viscosité. Cependant, sa résistance aux intempéries est comparable à celle du NR et du SBR, c'est-à-dire qu'elle n'est pas particulièrement élevée. Pour améliorer cette résistance, l'ajout de PVC est souvent utilisé, bien que cela puisse avoir un impact sur le comportement du matériau à basse température.

Le Polyuréthane

Il s'agit d'un polymère thermodurcissable obtenu par la réaction de dialcools avec des diisocyanates. Ce matériau est fréquemment utilisé dans la fabrication d'objets moulés tels que les chaussures de ski.

Le caoutchouc éthylène propylène (EPM et EPDM)

L'utilisation du copolymère d'éthylène et de propylène (EPM) comme additif pour améliorer l'indice de viscosité de certaines huiles lubrifiantes est répandue. Il peut être modifié en greffant une structure diénique pour former un copolymère éthylène-propylène-diène (EPDM). Le ratio éthylène/propylène et la quantité de greffons diène influent sur la résistance du polymère non vulcanisé, ses propriétés à basse température et sa capacité de vulcanisation. L'EPDM présente une excellente résistance aux intempéries et à l'ozone, ainsi qu'une flexibilité à basse température comparable à celle du NR. Il offre une meilleure résistance aux acides et aux bases par rapport au NR et au SBR. L'EPDM est largement utilisé dans l'industrie de la construction pour les membranes de toiture et de fenêtre, ainsi que pour prévenir la fissuration des flancs des pneus causés par l'ozone. Il est également utilisé comme isolant dans les câbles à moyenne et haute tension en raison de son excellente résistance électrique. Sa capacité à résister à l'absorption d'eau, combinée à sa bonne résistance mécanique et à son coût relativement abordable, en fait un matériau couramment utilisé pour les joints d'étanchéité dans les tuyaux d'eau et les radiateurs automobiles.

17.2.5 Formulation et vulcanisation

Le caoutchouc, qu'il soit naturel ou synthétique [68], est généralement utilisé en mélange avec d'autres ingrédients. Voici quelques-uns de ces ingrédients :

- Des charges renforçantes ou non, parmi lesquelles le noir de carbone est le plus couramment utilisé. Le noir de carbone confère aux produits en caoutchouc leur couleur noire et améliore les propriétés mécaniques ainsi que la résistance à l'abrasion. Dans les cas où une couleur noire n'est pas souhaitée, on peut utiliser des charges blanches telles que les silices précipitées, les argiles ou les craies précipitées. Les charges non renforçantes, également appelées "diluants", permettent de réduire le coût du mélange et d'augmenter sa densité. Par exemple, la craie broyée est utilisée dans des mélanges à faible résistance et à faible coût, comme pour les butées de porte domestiques.
- Des huiles, également connues sous le nom de plastifiants, sont ajoutées aux mélanges de caoutchouc pour améliorer certaines propriétés.
- Des agents de protection tels que des agents anti-UV ou des ignifugeants peuvent être utilisés pour améliorer la résistance aux rayons ultraviolets ou la réaction au feu.

- Des produits destinés à la vulcanisation, tels que le soufre ou les peroxydes organiques, l'oxyde de zinc, les accélérateurs, etc., sont ajoutés pour permettre la réticulation du caoutchouc et améliorer ses propriétés mécaniques.
- Divers autres produits peuvent être utilisés, tels que des colorants ou des pigments pour la coloration, ainsi que des agents gonflants pour donner des propriétés spécifiques au matériau.

Ces ingrédients sont ajoutés selon les besoins spécifiques de chaque application du caoutchouc.

Ainsi, ces différents ingrédients sont mélangés au caoutchouc pour obtenir les propriétés souhaitées dans les produits finis.

17.2.6 Utilisation

17.2.6.1 Industrie :

Le caoutchouc est largement utilisé dans divers secteurs industriels pour fabriquer des courroies, des flexibles, des pneus et des gaines de câbles informatiques. Il est souvent employé en association avec d'autres matériaux tels que le polychlorure de vinyle (PVC) et le Téflon

17.2.6.2 Médecine :

Le latex, couramment utilisé pour fabriquer des gants jetables, peut provoquer des réactions allergiques en raison de la présence de diverses protéines provenant de l'hévéa ou d'autres composés ajoutés pendant la fabrication. Cependant, le caoutchouc extrait du guayule, contenant moins de protéines, semble présenter un potentiel allergénique moindre [69].

17.2.6.3 Sports et jeux pour enfants :

Le caoutchouc est de plus en plus employé dans diverses applications, telles que les revêtements de sol pour terrains de jeux ou pistes de course, les gazons synthétiques utilisés notamment pour le football, les revêtements des raquettes de tennis de table, ainsi que dans la fabrication de chaussures.

17.2.6.4 Divers :

Le caoutchouc a également été exploré et utilisé dans divers autres domaines. Par exemple, il a été

Employé pour la conservation de la viande et comme joint pour les bords utilisés dans la pasteurisation et la stérilisation. Plus récemment, des latex fonctionnalisés magnétisés contenant des particules colloïdales magnétiques à base de maghémite ont été développés. Ces latex ont été spécifiquement conçus pour des applications dans les domaines de la pharmaco-chimie et du traitement des eaux usées par adsorption, notamment pour éliminer les métaux tels que le cuivre et le plomb. L'avantage de ces particules réside dans leur capacité à remplacer les méthodes conventionnelles de centrifugation, de sédimentation et de filtration. De plus, elles peuvent être réutilisées sur plusieurs cycles de désorption et de régénération [71].

17.2.7 Influence de la poudre caoutchouc sur l'argile

L'ajout de poudre de caoutchouc à l'argile peut avoir plusieurs effets sur les propriétés de l'argile. Les influences potentielles de la poudre de caoutchouc sur l'argile :

17.2.7.1 Résistance et flexibilité accrues :

La poudre de caoutchouc peut renforcer l'argile et lui conférer une plus grande résistance et flexibilité une fois cuite. Cela peut être bénéfique dans certaines applications, comme la poterie ou la sculpture, où la résistance aux fissures ou à la rupture est souhaitée.

17.2.7.2 Réduction de la rétraction :

L'argile a tendance à se contracter lorsqu'elle sèche et cuite, ce qui peut entraîner des fissures. L'ajout de poudre de caoutchouc peut réduire la rétraction de l'argile, minimisant ainsi le risque de fissures.

17.2.7.3 Amélioration des propriétés isolantes :

Le caoutchouc est un isolant thermique et électrique. En incorporant de la poudre de caoutchouc dans l'argile, on peut améliorer ses propriétés d'isolation thermique et électrique, ce qui peut être utile dans certaines applications spécifiques.

17.2.7.4 Texture et aspect visuel :

L'ajout de poudre de caoutchouc peut modifier la texture et l'apparence de l'argile. Cela peut donner à l'argile une texture plus douce, un aspect mat ou une apparence plus foncée, en fonction de la quantité et du type de poudre de caoutchouc utilisés.

Il convient de souligner que les effets de l'incorporation de poudre de caoutchouc dans l'argile peuvent différer selon la quantité de poudre de caoutchouc utilisée, le type d'argile et les conditions de cuisson. Il est donc conseillé de réaliser des essais et de suivre les recommandations spécifiques du fabricant afin d'obtenir les résultats souhaités.

17.3 Plâtre

17.3.1 Introduction

Le plâtre, un matériau de construction utilisé depuis des milliers d'années, est l'un des plus anciens connus de l'humanité. Des découvertes en Anatolie témoignent de son utilisation remontant à environ 9000 ans, principalement pour servir de support à des fresques murales. La raison de son utilisation précoce réside dans la basse température nécessaire pour obtenir de la poudre de plâtre, ainsi que dans l'abondance naturelle de gypse dans l'environnement.

Aujourd'hui, le plâtre trouve son utilisation principalement de deux façons : soit directement en tant qu'enduit, soit sous forme d'éléments préfabriqués tels que des carreaux ou des plaques, avec une couche de plâtre entre deux cartons. Ce matériau présente des caractéristiques idéales pour une utilisation en

intérieur, notamment en raison de ses propriétés isolantes sur le plan thermique et acoustique, ainsi que de sa résistance au feu. En effet, la conductivité thermique d'un enduit de plâtre est d'environ 0,26, comparée à 1,15 pour un enduit de ciment et à 50 pour l'acier. [50]

17.3.2 Définition

Le plâtre est un matériau de construction couramment utilisé pour le revêtement des murs et des plafonds. Il est fabriqué en mélangeant du gypse avec de l'eau pour former une pâte qui est ensuite appliquée sur les surfaces à recouvrir. Le plâtre permet de créer des surfaces lisses et planes, tout en offrant la possibilité d'ajouter des éléments décoratifs tels que des moulures et des rosaces.

Par ailleurs, le plâtre est également utilisé dans le domaine médical, particulièrement dans la fabrication de plâtres orthopédiques. Ces derniers sont utilisés pour immobiliser et soutenir les os fracturés. Les plâtres médicaux sont fabriqués à partir de bandes de plâtre spéciales qui sont trempées dans l'eau pour les rendre malléables, puis appliquées sur la zone blessée. Par la suite, le plâtre durcit, créant ainsi une coque rigide qui maintient l'os en place pendant la période de guérison.

Enfin, le plâtre trouve également son utilisation dans le domaine artistique pour la sculpture et la modélisation. En raison de sa facilité de manipulation, le plâtre est souvent choisi pour la création de moules destinés à la coulée de bronze et d'autres métaux. Il offre ainsi une solution pratique et efficace pour reproduire des œuvres d'art et créer des pièces métalliques.

17.3.3 Origine

La pierre de plâtre se présente sous deux formes naturelles, à savoir :

- L'anhydrite, une forme assez rare de sulfate de calcium anhydre, représentée par la formule chimique CaSO_4 .
- Le gypse, une forme très composée de sulfate de calcium d'hydraté, avec deux molécules d'eau, représentée par la formule chimique $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Le terme "plâtre" est utilisé à la fois pour désigner le matériau solide obtenu (plâtre durci) et la poudre nécessaire pour l'obtenir. Cette poudre, connue sous le nom de sulfate de calcium hémi hydraté ($\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$), est produite en déshydratant le gypse par une réaction [51].



17.3.4 Comportement du plâtre

Le plâtre est un matériau qui peut se comporter différemment en fonction de son utilisation. En général, le plâtre durcit lorsqu'il est exposé à l'air et devient plus solide avec le temps.

17.3.4.1 Durcissement :

Le processus de durcissement du plâtre se caractérise par une augmentation de sa rigidité à mesure qu'il sèche. La durée de ce processus peut varier de plusieurs heures à plusieurs jours, en fonction de la quantité d'eau présente dans le mélange, de la température ambiante et de l'humidité de l'air.

17.3.4.2 Rétraction :

Lorsque le plâtre durcit, il peut se rétracter légèrement en raison de l'évaporation de l'eau contenue dans le mélange. Cela peut entraîner des fissures et des imperfections dans la surface.

17.3.4.3 Résistance :

Le plâtre sec est un matériau solide qui peut supporter une certaine quantité de poids et de pression. Cependant, il peut se briser si une pression excessive est exercée sur lui ou s'il est soumis à un choc violent.

17.3.4.4 Perméabilité :

Le plâtre peut être poreux et permettre la circulation de l'air et de l'humidité. Cela peut être un problème dans les zones où l'humidité est élevée, car cela peut entraîner des dommages à long terme tels que la pourriture et la moisissure.

17.3.4.5 Adhérence :

Le plâtre adhère bien à une surface lisse et propre, mais peut avoir du mal à adhérer à une surface rugueuse ou sale. Cela peut entraîner des problèmes de qualité lors de l'application.

17.3.4.6 Expansion :

Le plâtre peut se dilater légèrement lorsqu'il est exposé à des températures élevées. Cela peut être un problème si le plâtre est utilisé dans des zones où les températures fluctuent régulièrement.

17.3.5 Composition du plâtre

Le plâtre est composé principalement de gypse, qui est un sulfate de calcium hydraté ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Le gypse est extrait de mines et de carrières, puis transformé en une fine poudre blanche. Cette poudre est ensuite mélangée avec de l'eau pour créer une pâte qui peut être appliquée sur différentes surfaces.

Le plâtre peut également contenir d'autres ingrédients pour améliorer ses propriétés. Par exemple, des additifs peuvent être incorporés pour accélérer ou retarder le temps de solidification, accroître la résistance à la flexion ou améliorer la résistance à l'eau. Des fibres de verre ou de cellulose peuvent également être mélangées pour renforcer le plâtre, améliorant ainsi sa résistance aux fissures et à l'usure.

Enfin, des pigments peuvent être intégrés pour conférer au plâtre une teinte spécifique. Cette pratique est souvent utilisée à des fins décoratives, comme la réalisation de moulures et de fresques.



Figure 37. Le plâtre

17.3.6 Influence du plâtre sur l'argile

Dans le domaine de l'art et de l'artisanat, le plâtre et l'argile sont des matériaux fréquemment employés. L'interaction entre ces deux matériaux peut différer selon la façon dont ils sont utilisés en combinaison.

17.3.6.1 Moulage :

Le plâtre est souvent utilisé pour réaliser des moules afin de reproduire des objets en argile. Le plâtre est coulé autour de l'argile pour former un moule qui sera ensuite utilisé pour créer des répliques en plâtre ou d'autres matériaux. Dans ce cas, le plâtre influence directement la forme et les détails de l'argile.

17.3.6.2 Séchage :

Si de l'argile humide est placée à proximité d'un plâtre sec, le plâtre peut absorber l'humidité de l'argile, provoquant son séchage plus rapide. Il est important de prendre en compte cette influence lors de la création d'objets en argile près de surfaces en plâtre.

17.3.6.3 Conservation :

Le plâtre peut être utilisé comme matériau de conservation pour l'argile. En enduisant une couche de plâtre sur une pièce en argile, cela peut aider à préserver sa forme et à empêcher l'argile de se fissurer ou de se déformer pendant le séchage.

17.3.6.4 Sculpture :

Le plâtre peut être utilisé comme support ou armature pour la sculpture en argile. En créant une structure en plâtre solide, il est possible de modeler l'argile autour de celle-ci, offrant une base solide et stable pour la sculpture.

17.3.6.5 Texture :

Si de l'argile est pressée contre une surface en plâtre texturée, cela peut transférer la texture du plâtre à l'argile. Cela peut être utilisé pour créer des effets décoratifs ou pour imiter des surfaces rugueuses ou gravées.

Il convient de noter que les influences du plâtre sur l'argile peuvent varier en fonction du type d'argile utilisé, de la technique appliquée et de la manière dont le plâtre est utilisé. Il est toujours recommandé de faire des tests et de se familiariser avec les caractéristiques spécifiques des matériaux pour obtenir les résultats souhaités.

17.3.7 Conclusion

Malgré l'utilisation ancienne du plâtre, sa présence dans le domaine de la construction reste limitée à quelques rôles secondaires. Malgré une consommation annuelle considérable de gypse, on constate l'absence de recherches approfondies pour le développement de ce matériau. De plus, on remarque l'absence de méthodes et de normes définies pour créer des compositions de plâtre.

Cette étude bibliographique permet de conclure qu'il est possible d'améliorer les propriétés du plâtre, notamment ses propriétés physiques et mécaniques, grâce à l'ajout d'additifs :

- Les adjuvants (accélérateurs et retardateurs de prise) ;
- Les graviers concassés ;
- Les sables siliceux ;
- Les fibres végétales ;

Chapitre 03 : Essai de cisaillement direct à la boîte

18 Essai : d'absorption et la réfraction

18.1.1 Essai : (d'absorption et la réfraction) d'argile

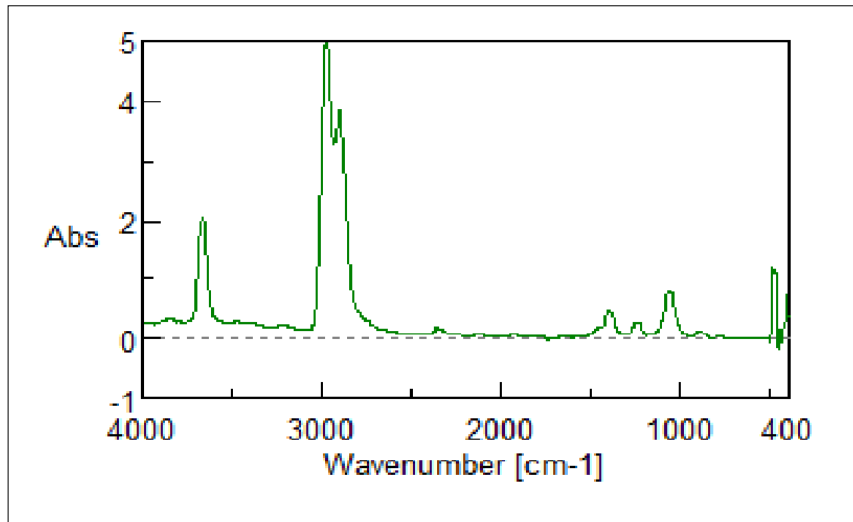


Figure22. Taux absorption

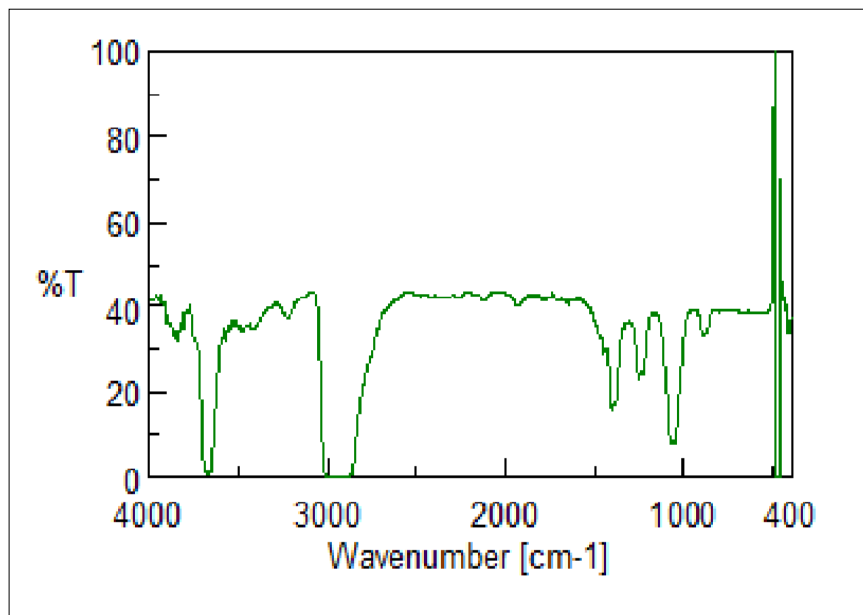


Figure23. Taux de réfraction

18.1.2 Essai : (d'absorption et la réfraction) du verre

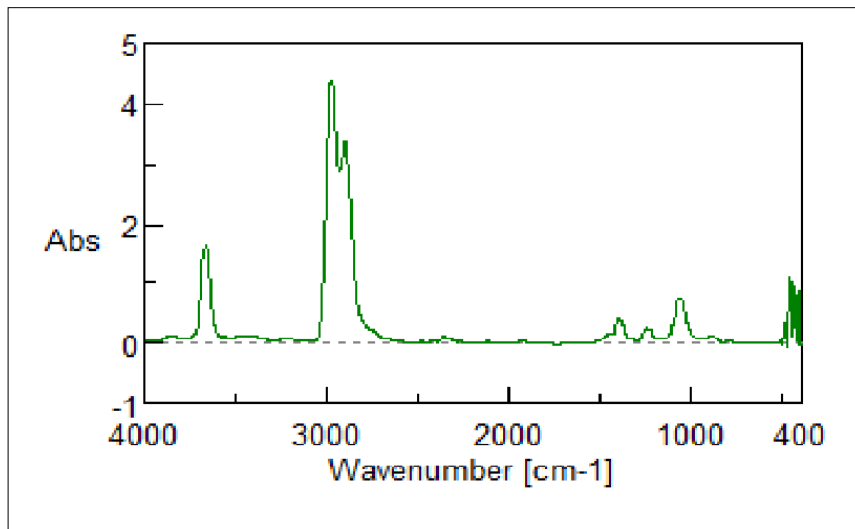


Figure29. Taux d'absorption

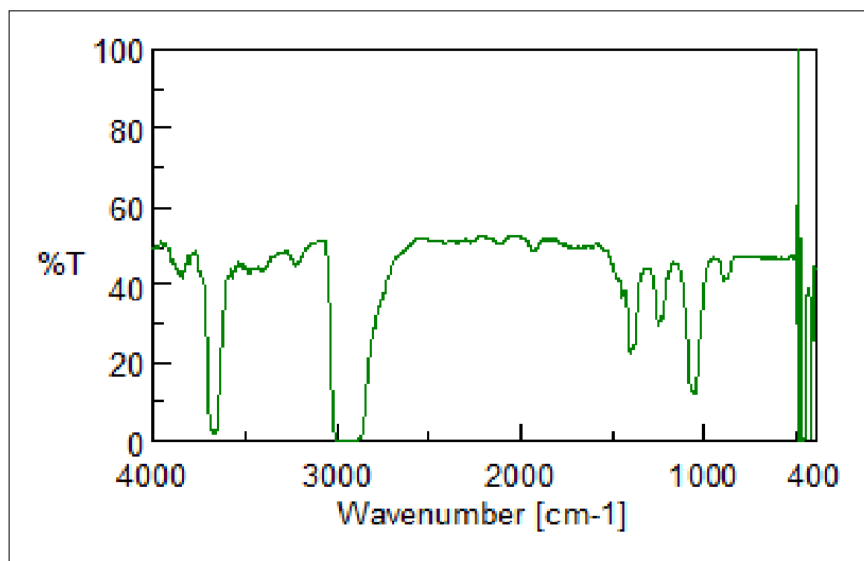


Figure 30. Taux de réfraction

18.1.3 Essai : (d'absorption et la réfraction) du plâtre

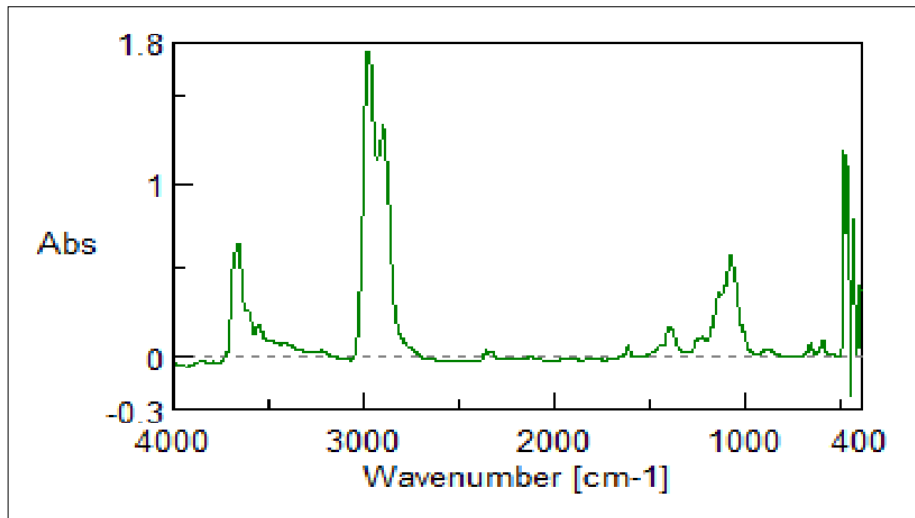


Figure 38. Taux d'absorption

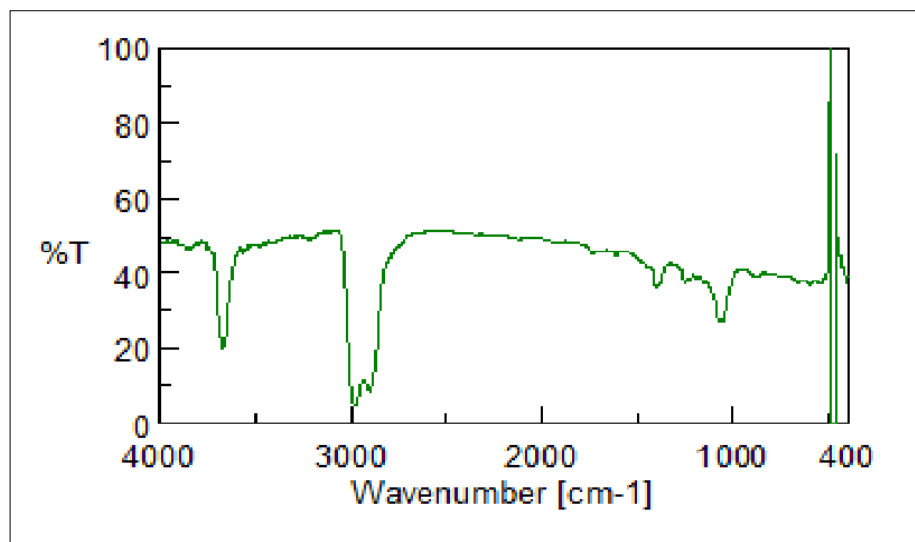


Figure 39. Taux de réfraction

18.1.4 Essai : (d'absorption et la réfraction) du caoutchouc

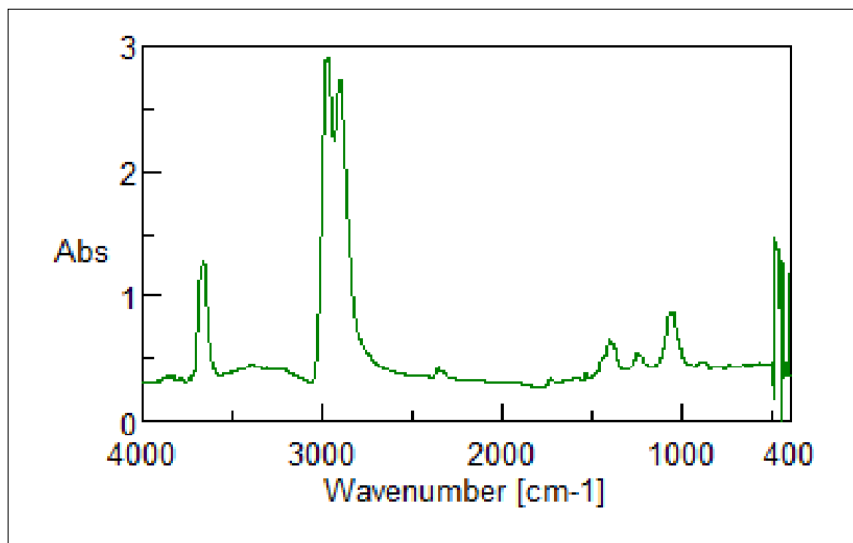


Figure 35. Taux d'absorption

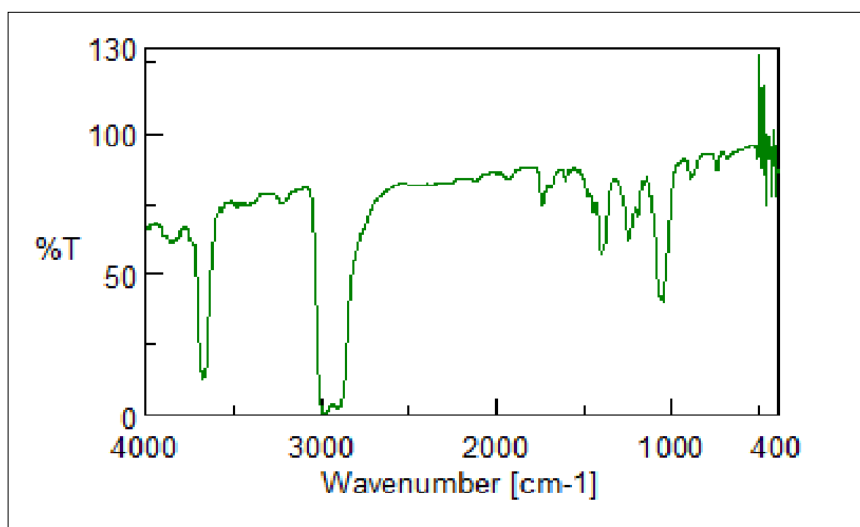


Figure 36. Taux de réfraction

19 Essai de cisaillement direct à la boîte

19.1 Introduction

La résistance au cisaillement d'un sol est un paramètre crucial à connaître dans tous les travaux de génie civil. Les caractéristiques mécaniques, telles que C et Φ , obtenues à partir des essais de cisaillement, sont directement utilisées dans les calculs des fondations et de la stabilité des argiles.

Dans cette étude, nous avons réalisé des essais de cisaillement sur les échantillons suivants :

- Le cisaillement des matériaux individuellement, tels que l'argile, le verre, le plâtre et le caoutchouc.

19.2 Appareillage

L'appareil est constitué des éléments suivants :

- Une section intérieure de la boîte de cisaillement A, avec une dimension de 1×1 , soit $(60 \times 60) \text{ mm}^2$. Cette section est composée de deux demi-boîte.
- Un système mécanique permettant d'appliquer les contraintes verticales requises.
- Un système mécanique permettant de déplacer horizontalement la demi-boîte inférieure.
- Un anneau dynamométrique indique les forces de cisaillement.
- Un comparateur précis au $1/1000$ de millimètres indique les déplacements horizontaux.
- Un comparateur précis au $1/100$ de millimètres indique les déplacements verticaux.
- Un chronomètre pour prendre des mesures toutes les 15 secondes.

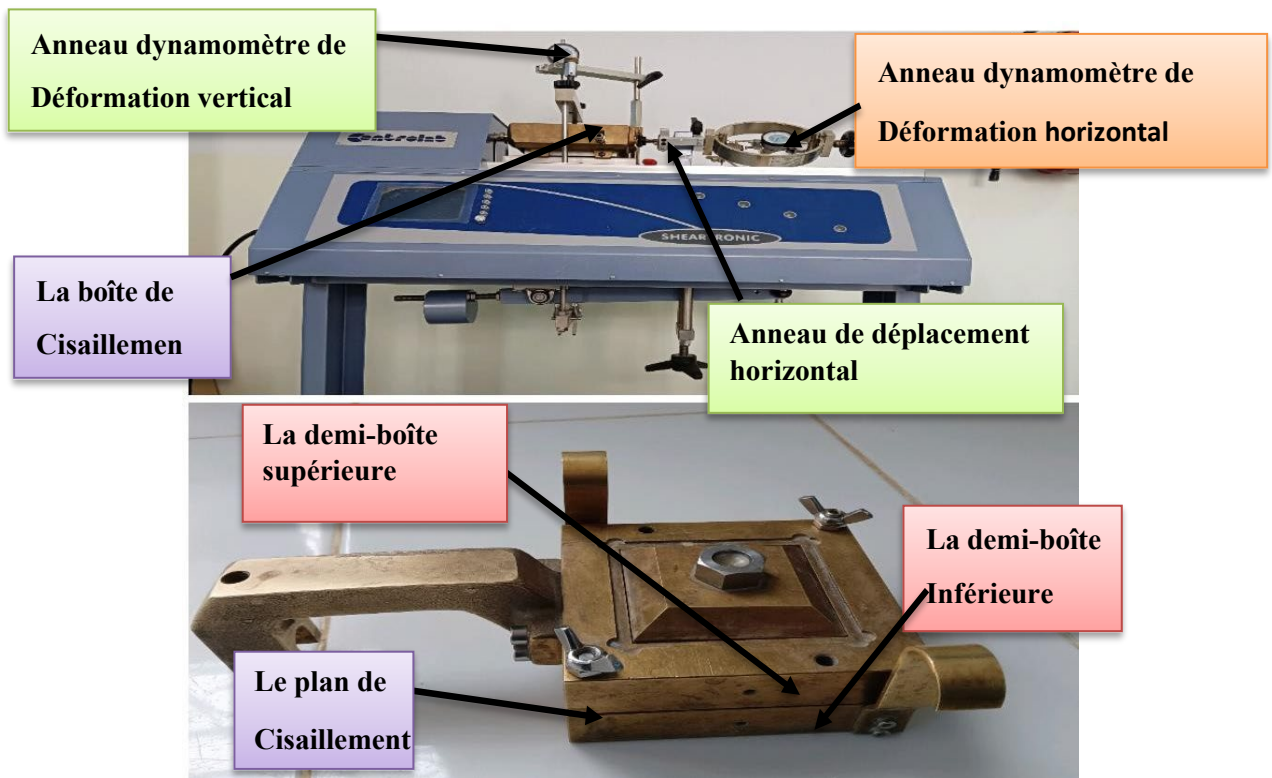


Figure 40. appareillage de cisaillement direct à la boîte

19.3 Mode opératoire

Les essais sont effectués conformément à la norme française (NFP94-071-1) sur des échantillons qui ont été humidifiés jusqu'à atteindre leur teneur en eau optimale. Avant de procéder à l'essai, il convient de préparer l'échantillon et de le placer dans la boîte de manière à ce que le plan de cisaillement soit aligné avec le point de contact entre les différents matériaux présents dans la boîte.

19.4 Déroulement de l'essai

- Les valeurs des comparateurs sont converties en unités de calcul.
- Exécution de l'essai après avoir préparé l'échantillon et l'avoir placé dans la boîte de cisaillement :
- Appliquer sur la face supérieure de l'échantillon une force verticale (N) résultant du poids placé sur le plateau, respectant ainsi une contrainte normale σ de (1, 2, 3) bars, maintenue constante pendant toute la durée de l'essai.
- Mettre tous les comparateurs à zéro.
- Ajustez la vitesse de la machine de manière à maintenir un déplacement horizontal constant entre les deux demi-boîte.
- Démarrez la machine et prenez les mesures des trois comparateurs simultanément à des intervalles de temps réguliers, toutes les 15 secondes.

- La rupture est sensible lorsque le graphe $\tau = f(\Delta l)$ présente un pic ou un plateau, ce qui indique l'arrêt de l'essai après quelques mesures décroissantes ou stabilisées. Sinon, l'essai se poursuit jusqu'à la fin de la course.

19.5 Toutes les lectures obtenues

Essai de cisaillement des trois matériaux séparément

Dans cette partie quater échantillons ont été cisailé :

19.5.1 Echantillon N°1 : argile



Figure 41. Echantillon N°1 après cisaillement

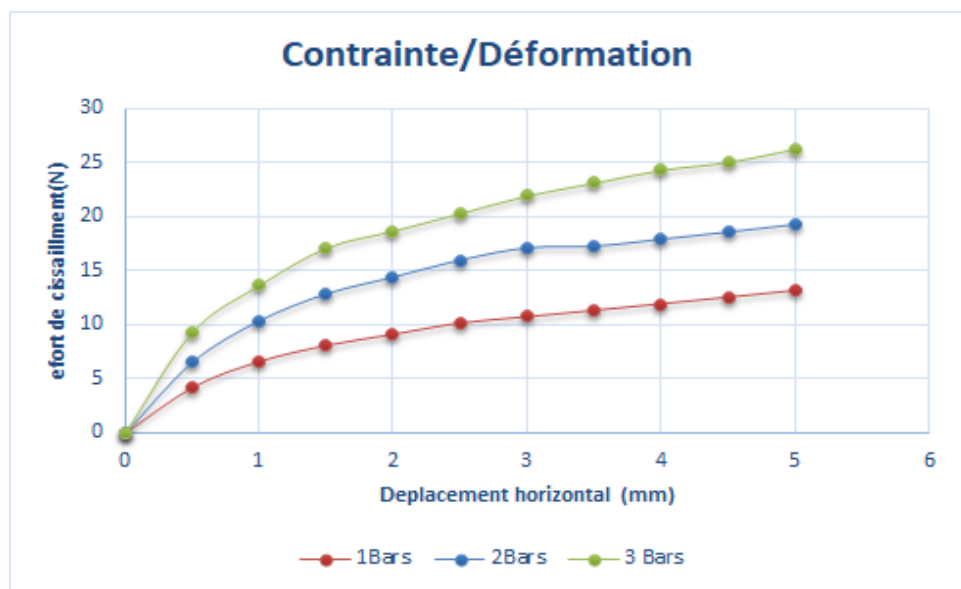


Figure 42. Cisaillement de l'échantillon témoin (argile)

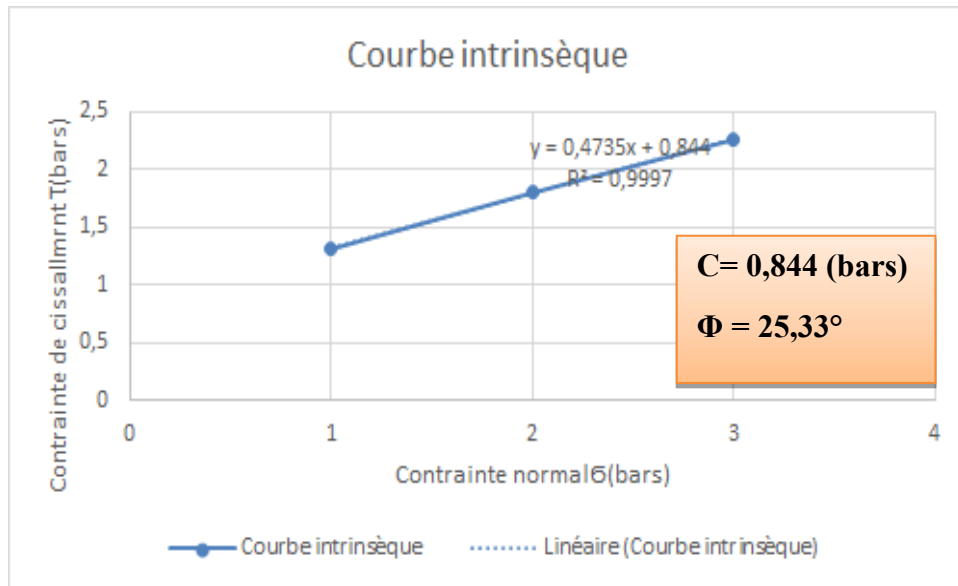


Figure 43. Courbe intrinsèque de cisaillement de l'échantillon témoin (argile)

19.6 Essais de cisaillement de l'argile avec des ajouts

Dans cette partie, des échantillons reconstitués selon les combinaisons suivantes :

19.6.1 Argile + verre :

19.6.1.1 Echantillon N°2 : argile + 5% verre



Figure 44. Echantillon N°2 après cisaillement.

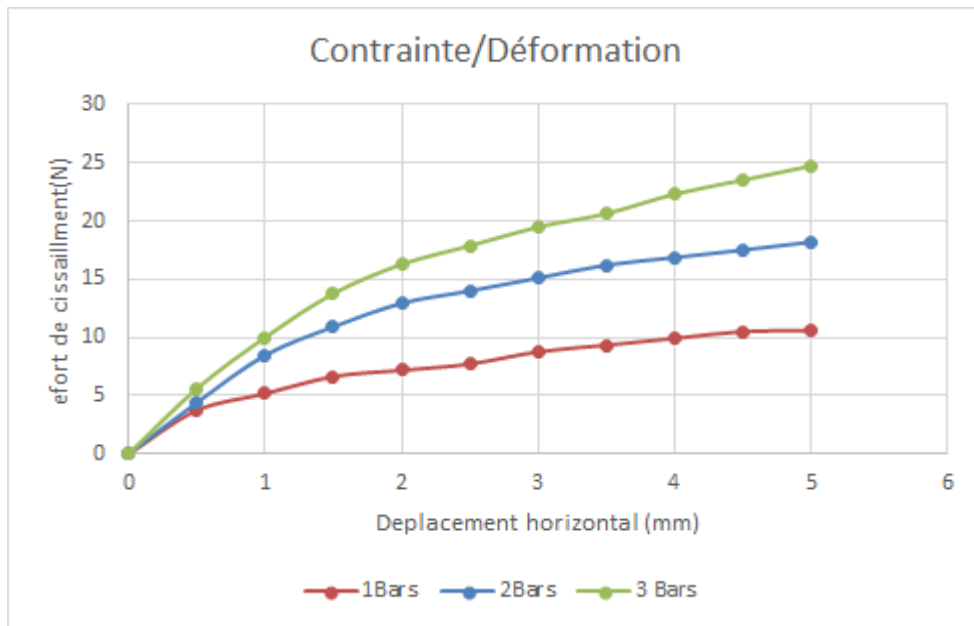


Figure 45. Cisaillement de l'échantillon d'argile avec ajout de **5%** de verre

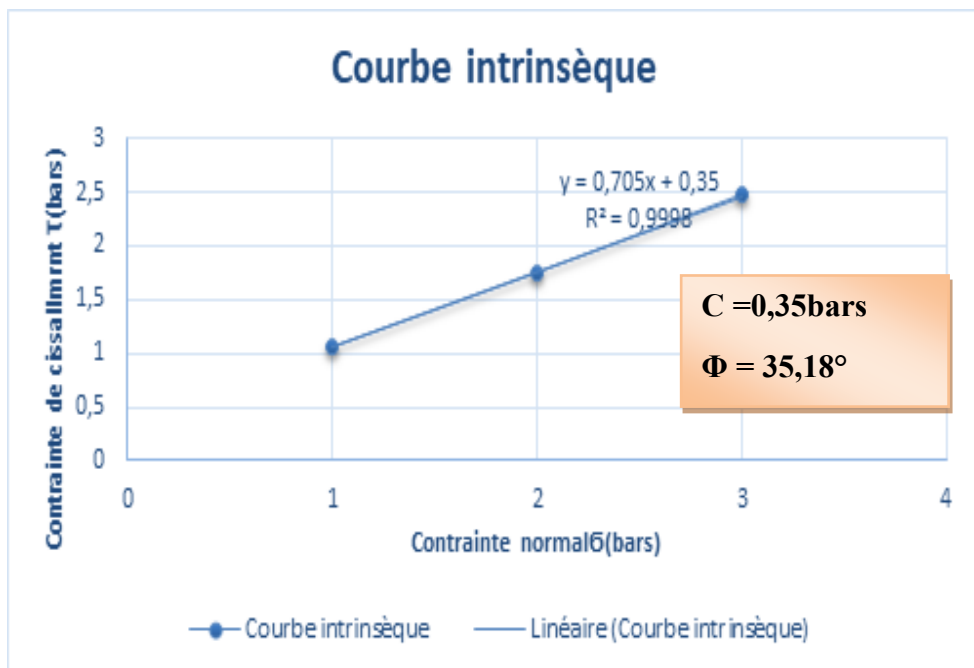


Figure 46. Courbe intrinsèque de cisaillement de l'échantillon d'argile avec ajout de **5%** de verre



Figure 47. Comparaison entre les courbes intrinsèques de cisaillement de l'échantillon N° 1 et de l'échantillon N°2

COMMENTAIRE 1:

Il y a augmentation de frottement ($25.33^\circ - 35.18^\circ$) qui est dû au frottement de rajout verre et une diminution de la cohésion ($0,884 \text{ bars} - 0,35 \text{ bars}$) d'une valeur très considérable ce que justifié la faiblesse de cohésion de mélange formé.

19.6.1.2 Echantillon N°3 : argile + 10% verre

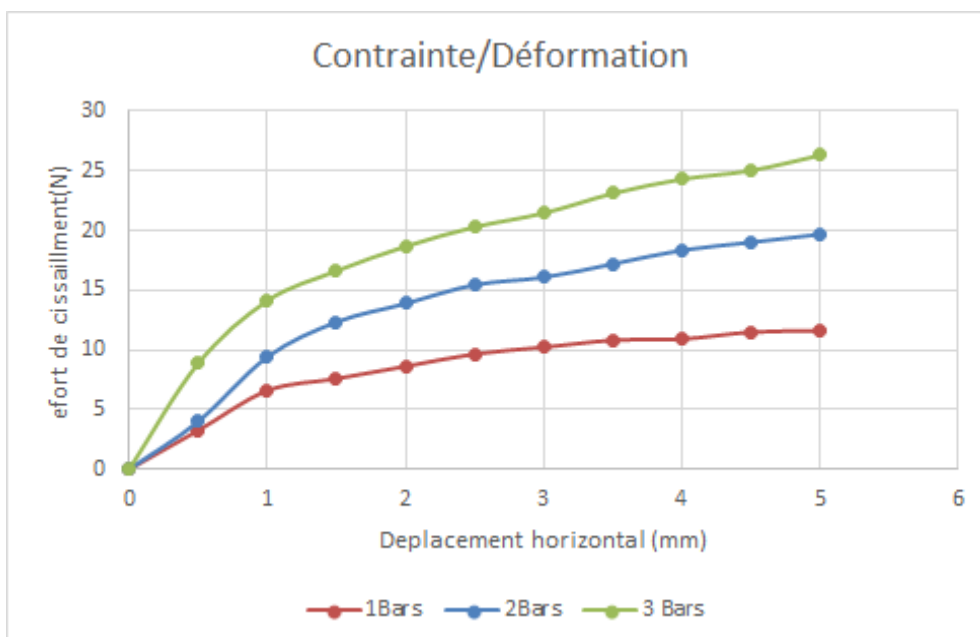


Figure 48. Cisaillement de l'échantillon d'argile avec ajout de **10 %** de verre

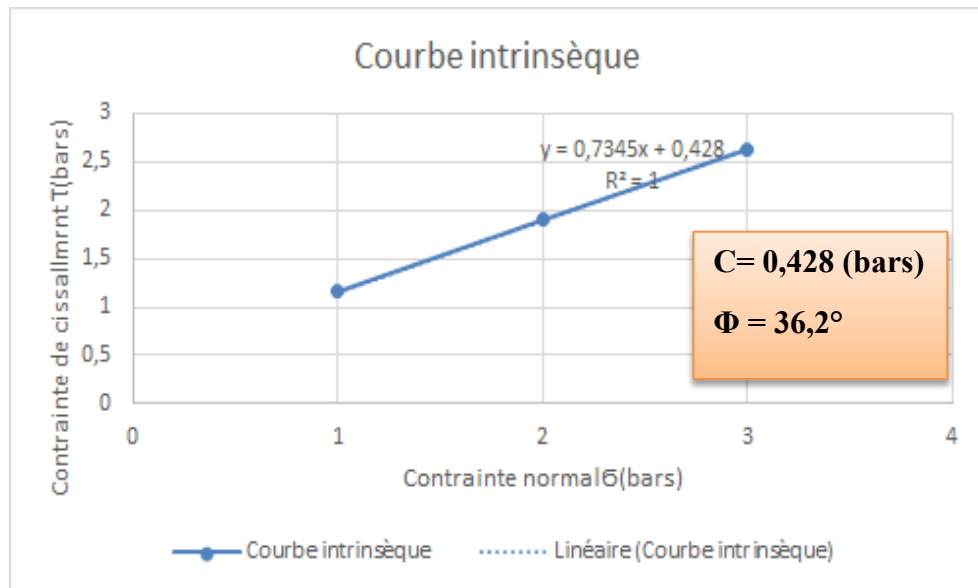


Figure 49. Courbe intrinsèque de cisaillement de l'échantillon d'argile avec ajout de **10%** de verre



Figure 50. Comparaison entre les courbes intrinsèques de cisaillement de l'échantillon N° 1 et de

l'échantillon N° 3

COMMENTAIRE 2 :

Il y a augmentation de frottement ($25.33^\circ - 36.2^\circ$) qui est dû au frottement de rajout verre et une diminution de la cohésion ($0.884 \text{ bars} - 0.428 \text{ bars}$) d'une valeur très considérable ce que justifié la faiblesse de cohésion de mélange formé.

19.6.1.3 Echantillon N°4 : argile+ 15% verre

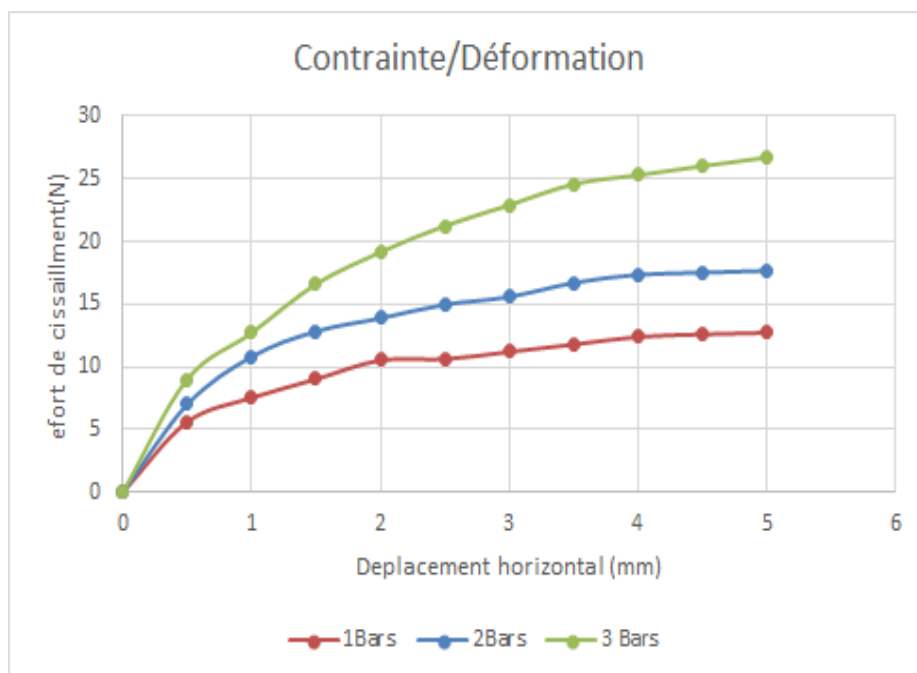


Figure 51. Cisaillement de l'échantillon d'argile avec ajout de **15%** de verre

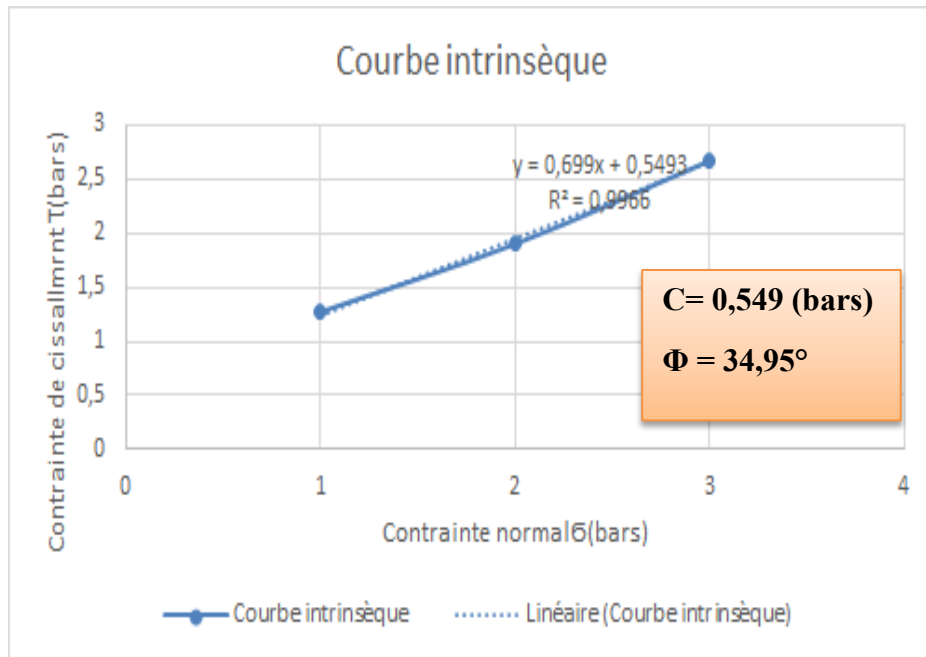


Figure 52. Courbe intrinsèque de cisaillement de l'échantillon d'argile avec ajout de **15%** de verre

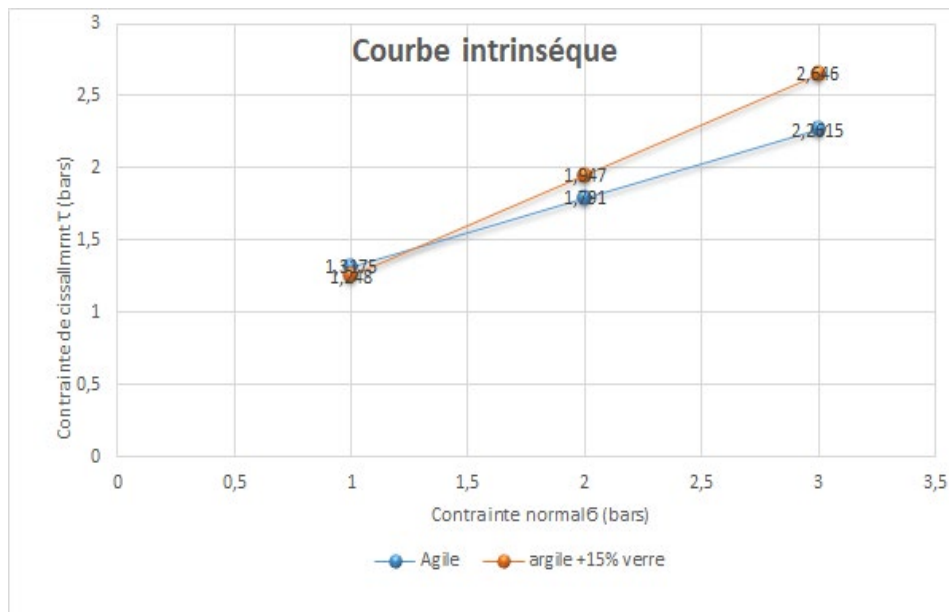


Figure 53. Comparaison entre les courbes intrinsèques de cisaillement de l'échantillon N° 1 et de l'échantillon N°4

COMMENTAIRE 3:

Il y a augmentation de frottement ($25.33^\circ - 34.95^\circ$) qui est dû au frottement de rajout verre et une diminution de la cohésion ($0.884 \text{ bars} - 0.549 \text{ bars}$) d'une valeur très considérable ce que justifié la faiblesse de cohésion de mélange formé.

COMMENTAIRE GENERALE (VERRE) :

pour avoir une argile très cohésif, il faut rajouter des quantités de **15%** de verre broyé (**15%** de verre + argile) et pour améliorer les frottements il suffit de rajouter **10%** de verre.

19.6.2 Argile + plâtre :

19.6.2.1 Echantillon N°5 : argile + 5% plâtre

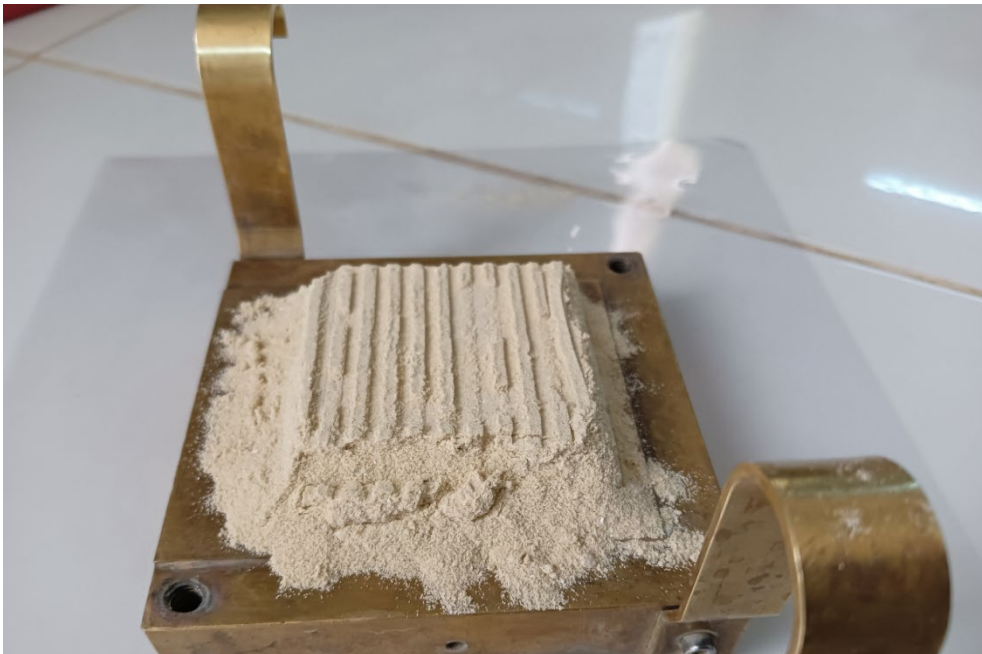


Figure 54. Echantillon N°5 après cisaillement.

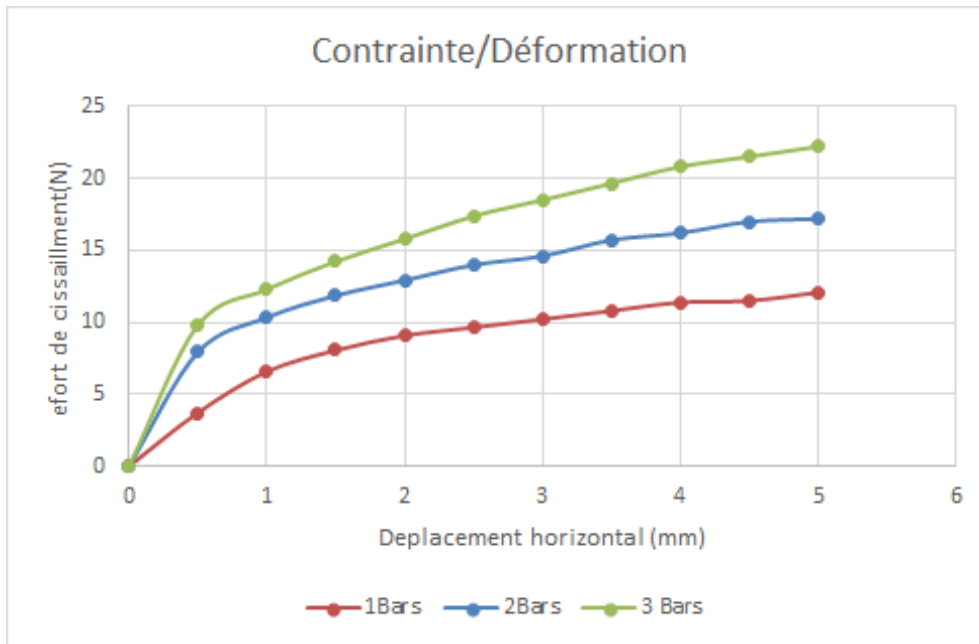


Figure 55. Cisaillement de l'échantillon d'argile avec ajout de 5% de Platre

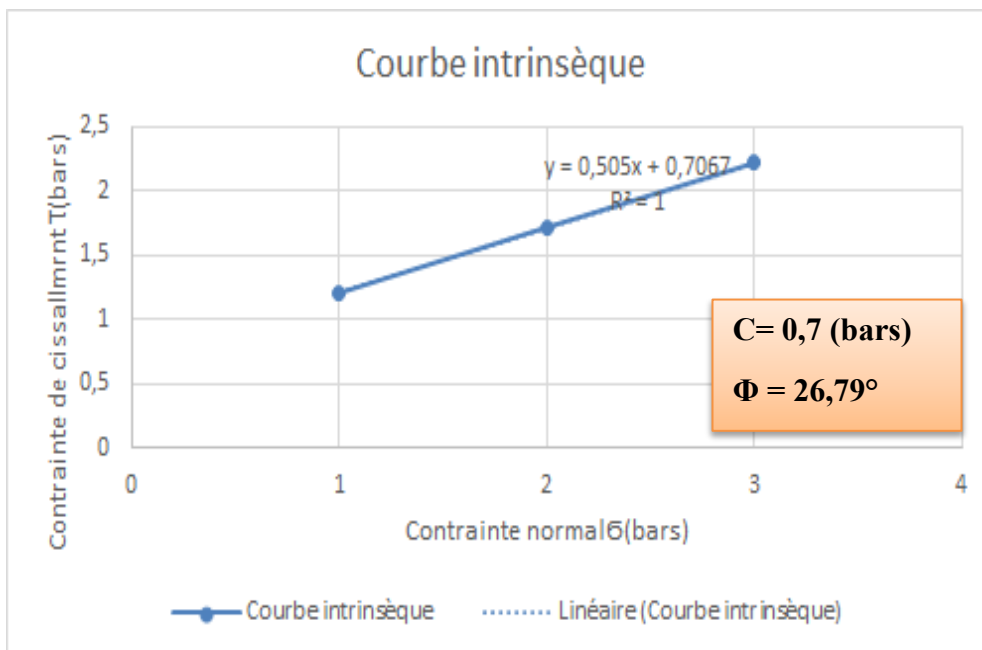


Figure 56. Courbe intrinsèque de cisaillement de l'échantillon d'argile avec ajout de 5% de platre

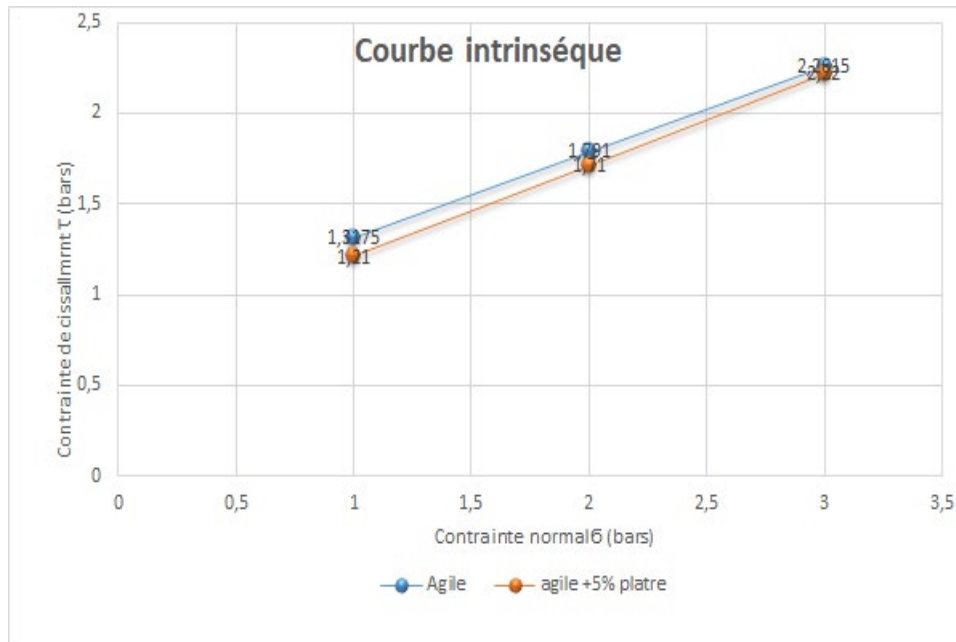


Figure 57. Comparaison entre les courbes intrinsèques de cisaillement de l'échantillon N°1 et de l'échantillon N°5

COMMENTAIRE 1:

Il y a diminution de frottement ($26.79^\circ - 34.95^\circ$) qui est dû au frottement de rajout plâtre et une diminution de la cohésion (**0.884 bars – 0.7 bars**) d'une valeur très considérable ce que justifié la faiblesse de cohésion de mélange formé.

19.6.2.2 Echantillon N°6 : argile + 10% plâtre

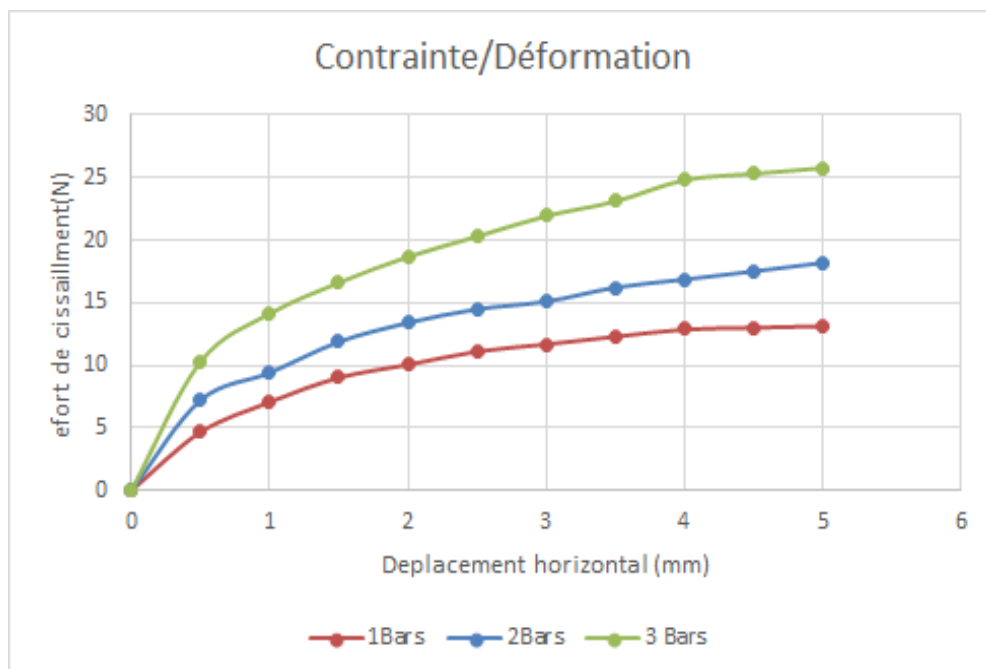


Figure 58. Cisaillement de l'échantillon d'argile avec ajout de **10%** de plâtre

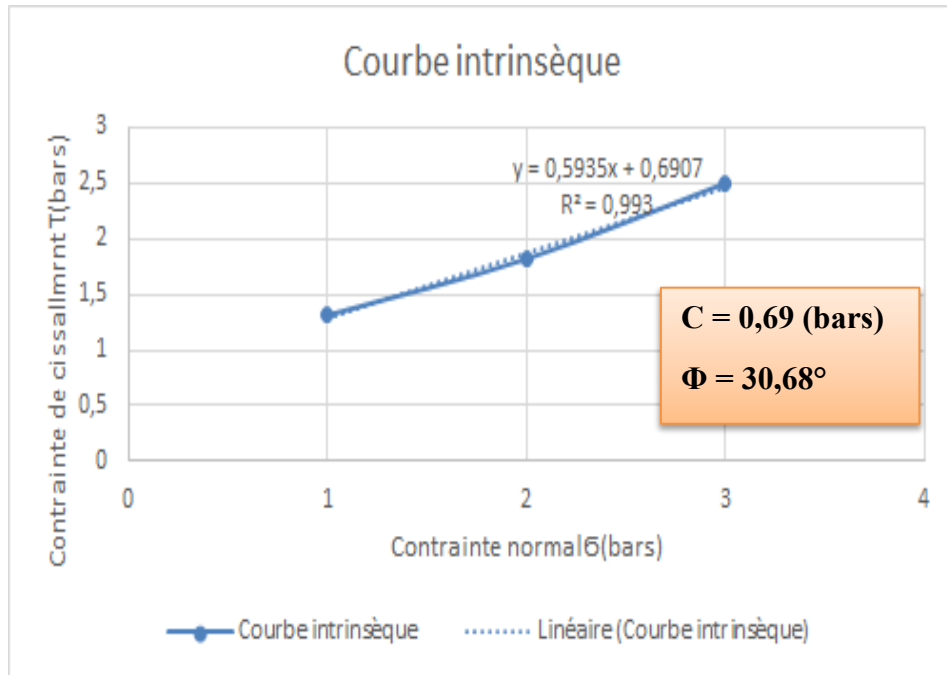


Figure 59. Courbe intrinsèque de cisaillement de l'échantillon d'argile avec ajout de **10%** de plâtre

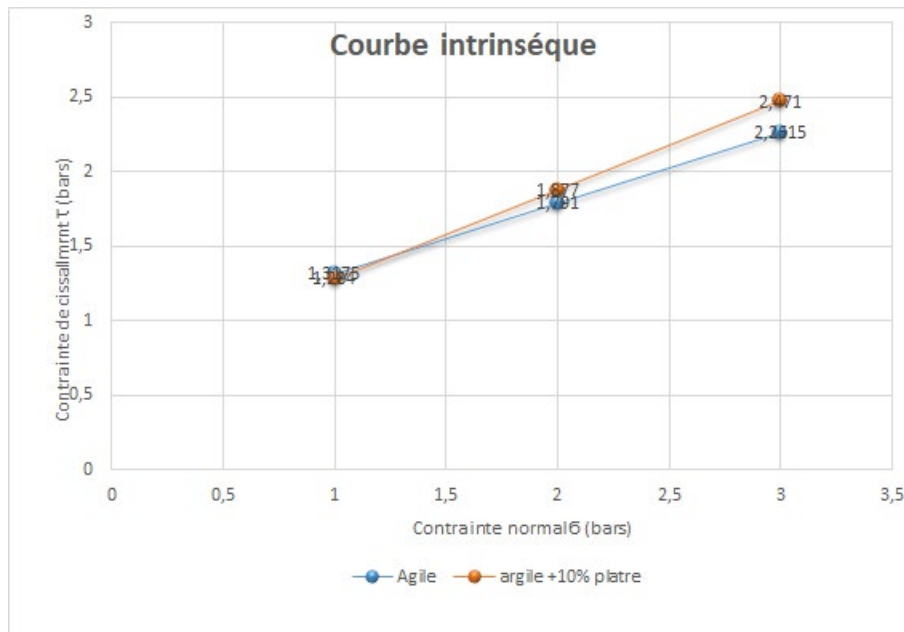


Figure 60. Comparaison entre les courbes intrinsèques de cisaillement de l'échantillon N°1 et de l'échantillon N°6

COMMENTAIRE 2 :

Il y a diminution de frottement ($30.68^\circ - 34.95^\circ$) qui est dû au frottement de rajout plâtre et une diminution de la cohésion (0.884 bars – 0.69 bars) d'une valeur très considérable ce que justifié la faiblesse de cohésion de mélange formé.

19.6.2.3 Echantillon N°7 : argile + 15% plâtre

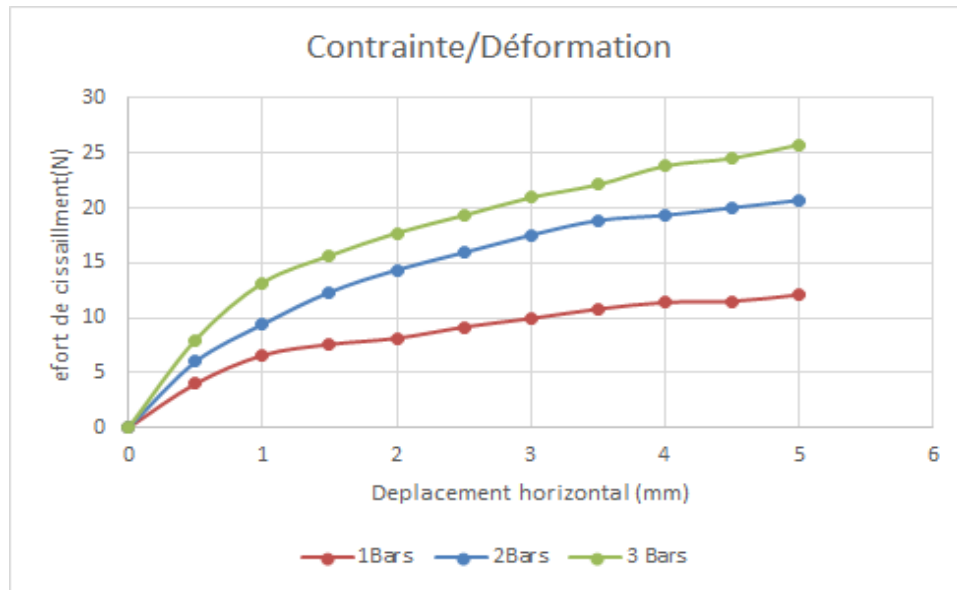


Figure 61. Cisaillement de l'échantillon d'argile avec ajout de **15%** de plâtre

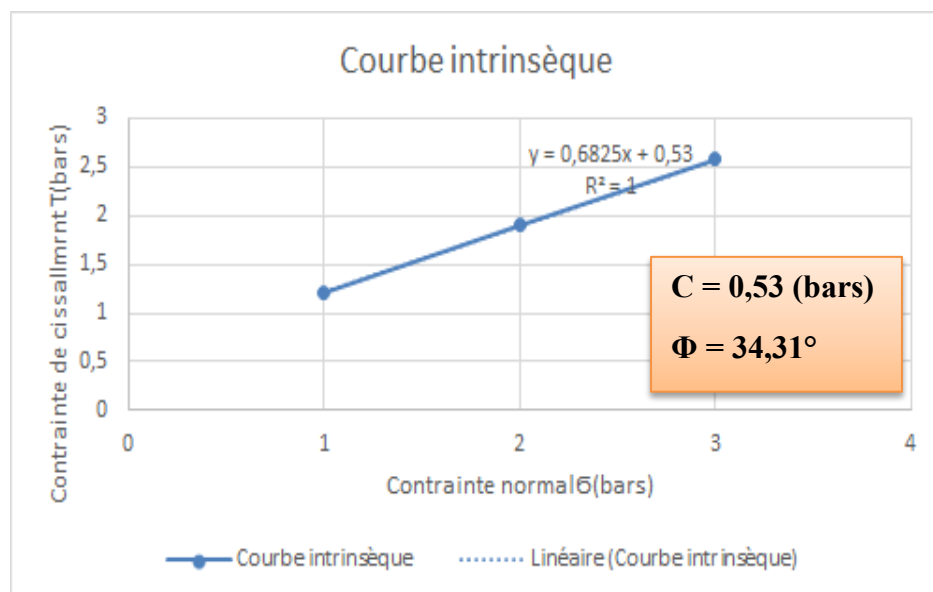


Figure 62. Courbe intrinsèque de cisaillement de l'échantillon d'argile avec ajout de **15%** de plâtre

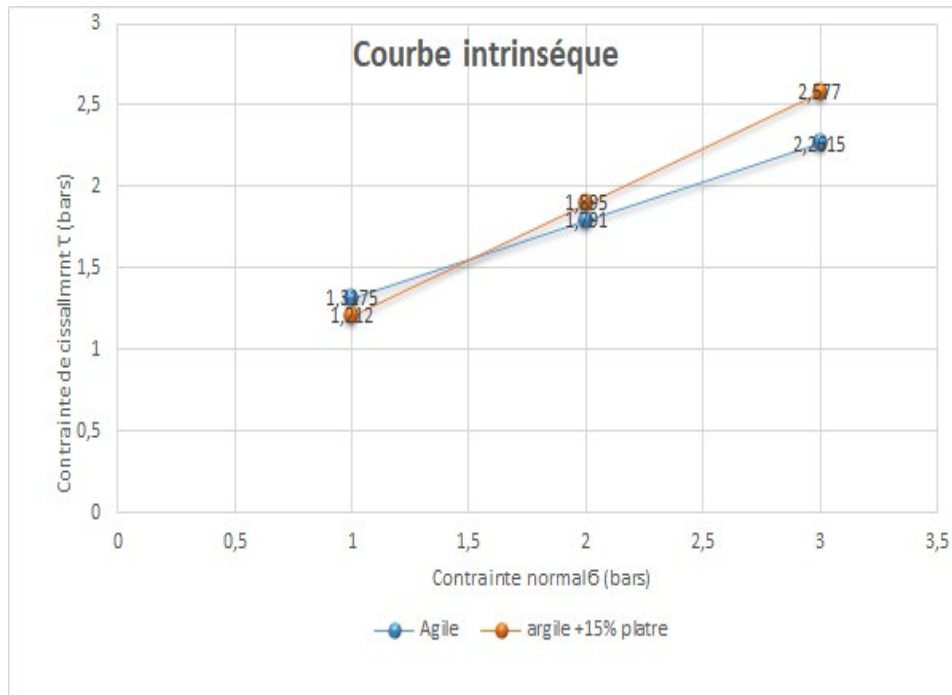


Figure 63. Comparaison entre les courbes intrinsèques de cisaillement de l'échantillon N°1 et de l'échantillon N°7

COMMENTAIRE 3:

Il y a une petite diminution de frottement ($34.31^\circ - 34.95^\circ$) qui est dû au frottement de rajout plâtre et une diminution de la cohésion (0.884 bars – 0.53 bars) d'une valeur très considérable ce que justifié la faiblesse cohésion de mélange formé.

COMMENTAIRE GENERALE :

pour diminuer la cohésion de l'argile considère il suffit de rajouter des quantités du plâtre de lordre (de 5% a 15%) et a chaque fois quand augmente le pourcentage la cohésion diminue rapidement par contre les frottement diminue d'une manière régulière par rapport a la valeur initiale de l'argile, les frottement augmentes avec croissance de pourcentage de rajout .

19.6.3 Argile + caoutchouc :

19.6.3.1 Echantillon N°8 : argile + 5% Caoutchouc

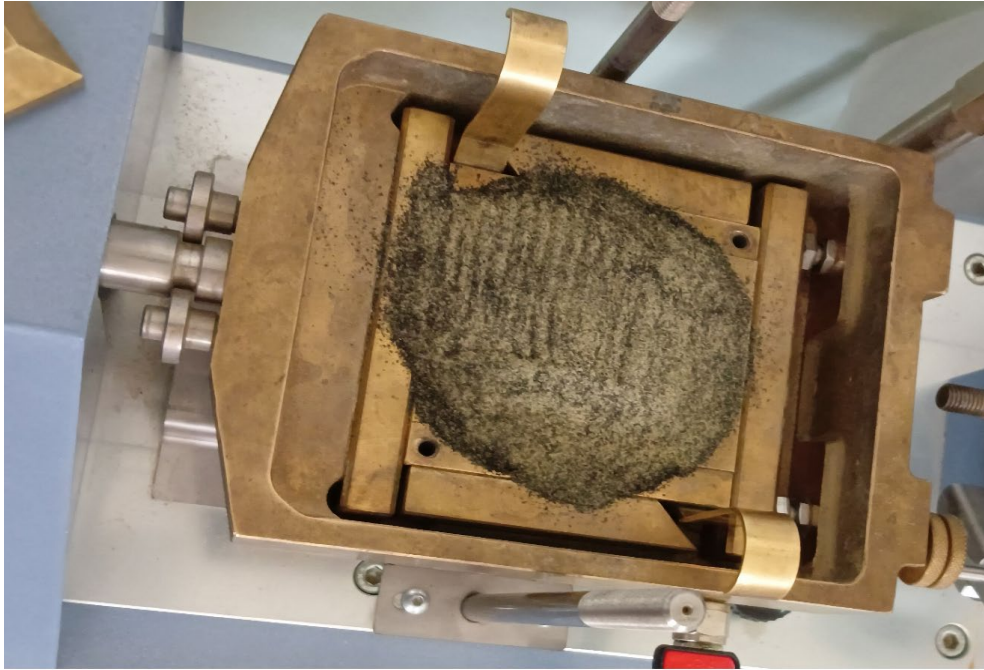


Figure 64. Echantillon N°8 après cisaillement.

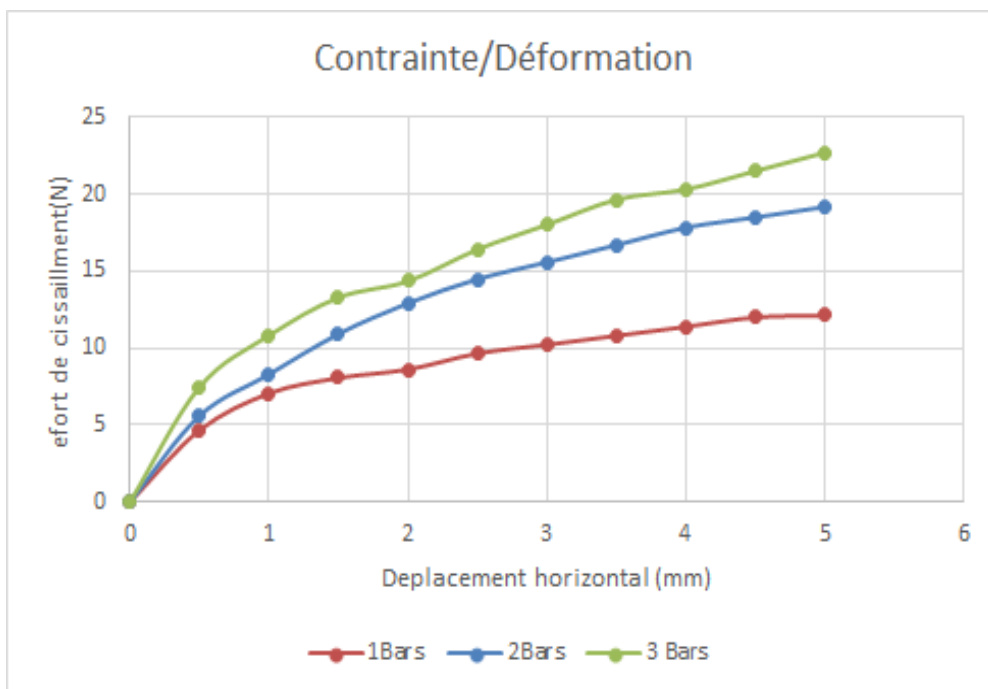


Figure 65. Cisaillement de l'échantillon d'argile avec ajout de 5% de caoutchouc

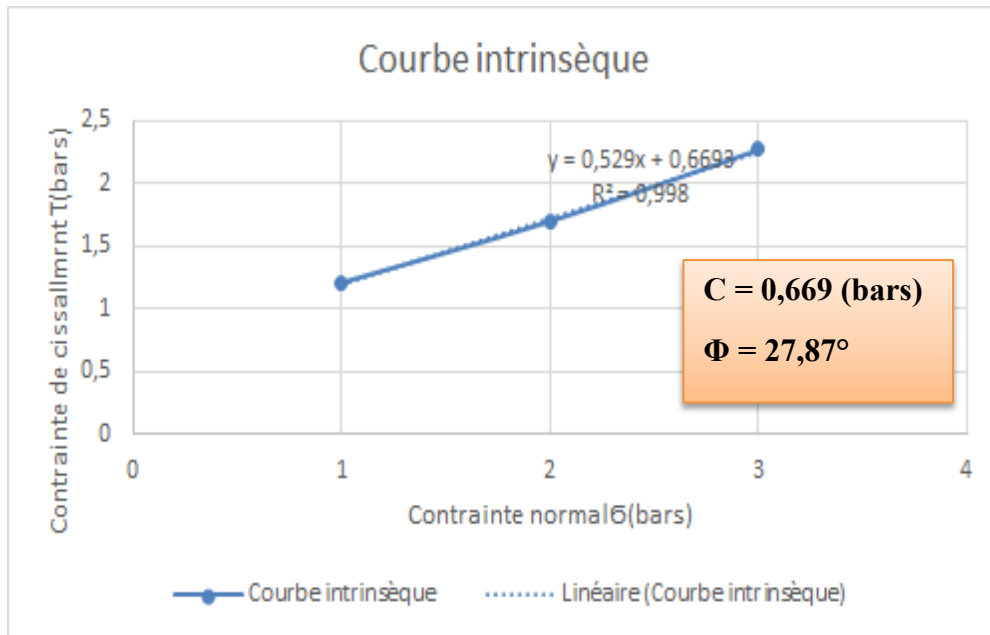


Figure 66. Courbe intrinsèque de cisaillement de l'échantillon d'argile avec ajout de 5% de caoutchouc

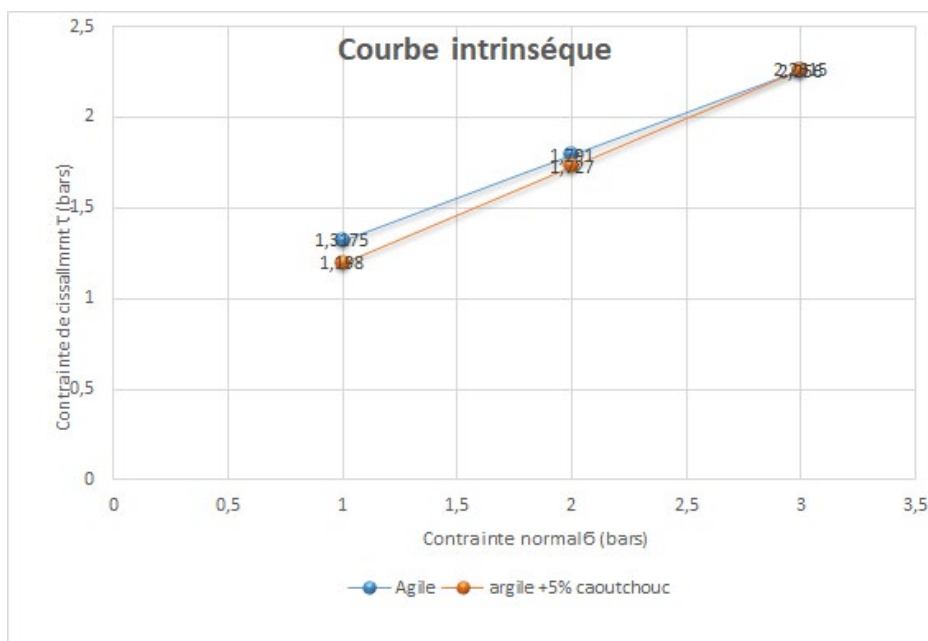


Figure 67. Comparaison entre les courbes intrinsèques de cisaillement de l'échantillon N°1 et de l'échantillon N°8

COMMENTAIRE 1 : Il y a une diminution de frottement ($27.87^\circ - 34.95^\circ$) qui est dû au frottement de rajout caoutchouc et une diminution de la cohésion ($0.884 \text{ bars} - 0.669 \text{ bars}$) d'une valeur très considérable ce que justifié la faiblesse cohésion de mélange formé.

19.6.3.2 Echantillon N°9 : argile + 10% Caoutchouc

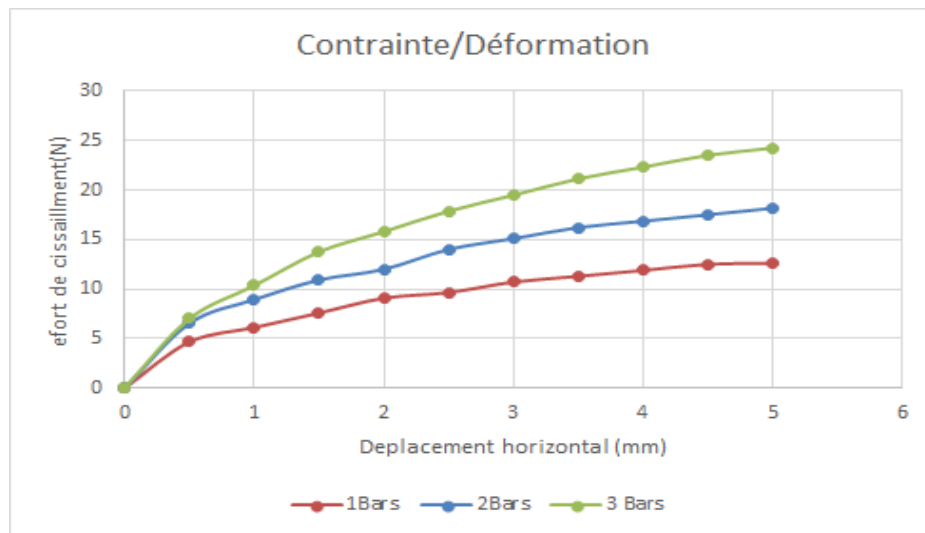


Figure 68. Cisaillement de l'échantillon d'argile avec ajout de 10% Caoutchouc

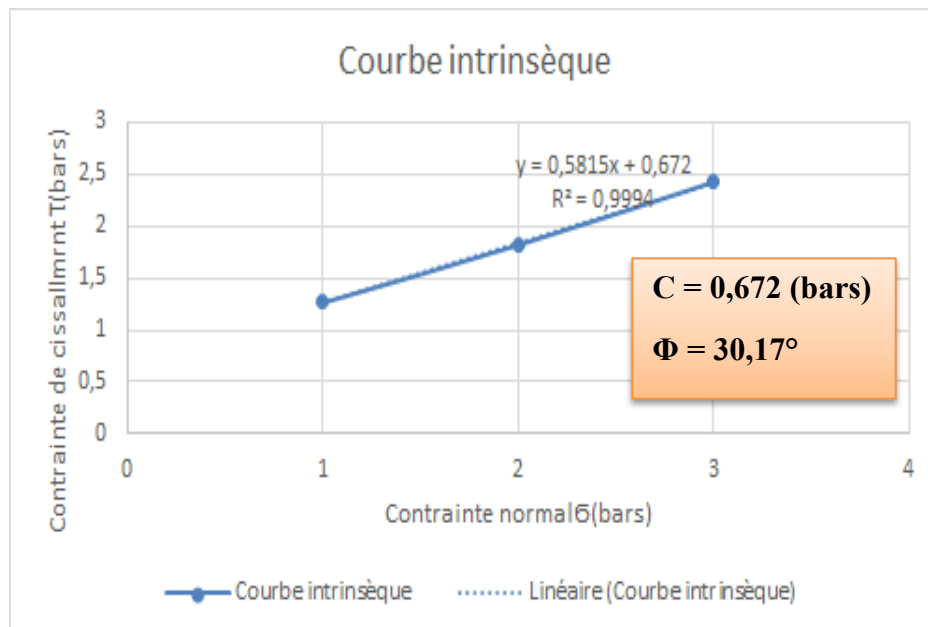


Figure 69. Courbe intrinsèque de cisaillement de l'échantillon d'argile avec ajout de **10%** de caoutchouc

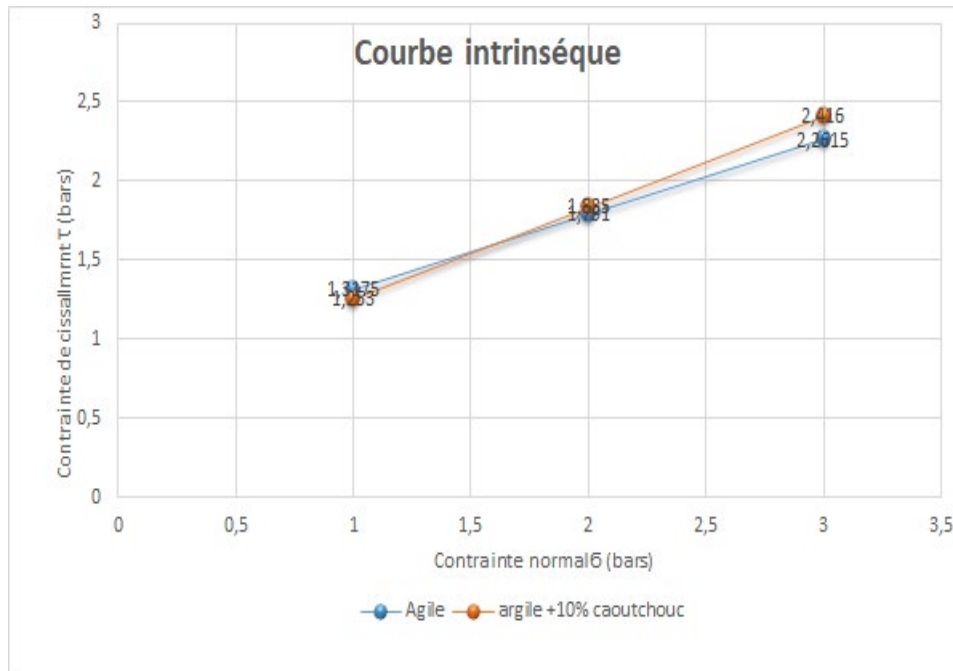


Figure 70. Comparaison entre les courbes intrinsèques de cisaillement de l'échantillon N°1 et de l'échantillon N°8

COMMENTAIRE 2: Il y a une diminution de frottement ($30.17^\circ - 34.95^\circ$) qui est dû au frottement de rajout caoutchouc et une diminution de la cohésion ($0.884 \text{ bars} - 0.672 \text{ bars}$) d'une valeur très considérable ce que justifié la faiblesse cohésion de mélange formé.

19.6.3.3 Echantillon N°10 : argile + 15% Caoutchouc

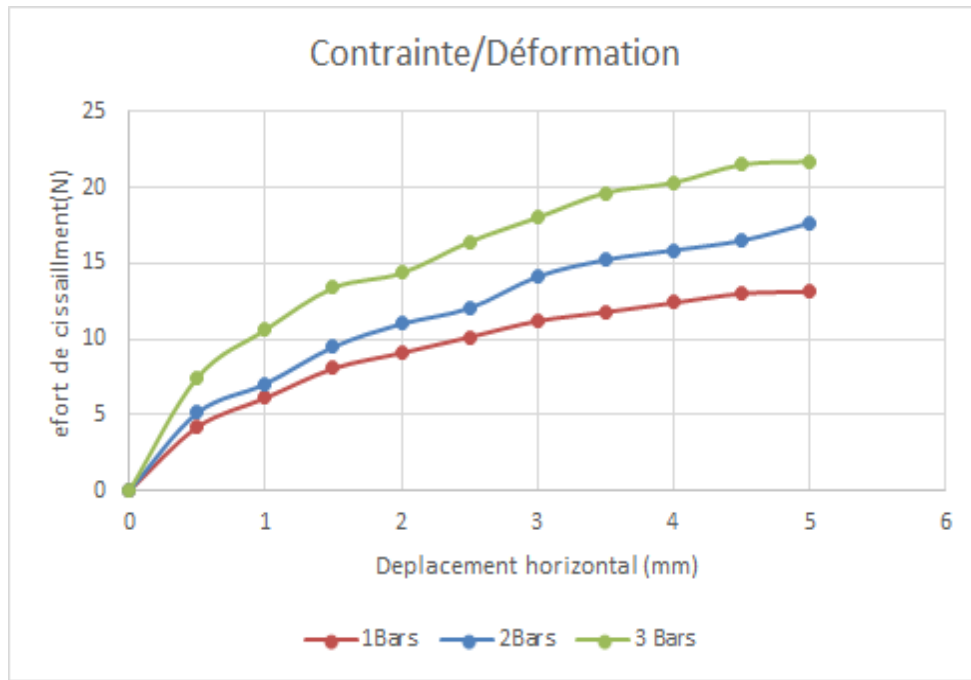


Figure 71. cisaillement de l'échantillon d'argile avec ajout de **15%** Caoutchouc

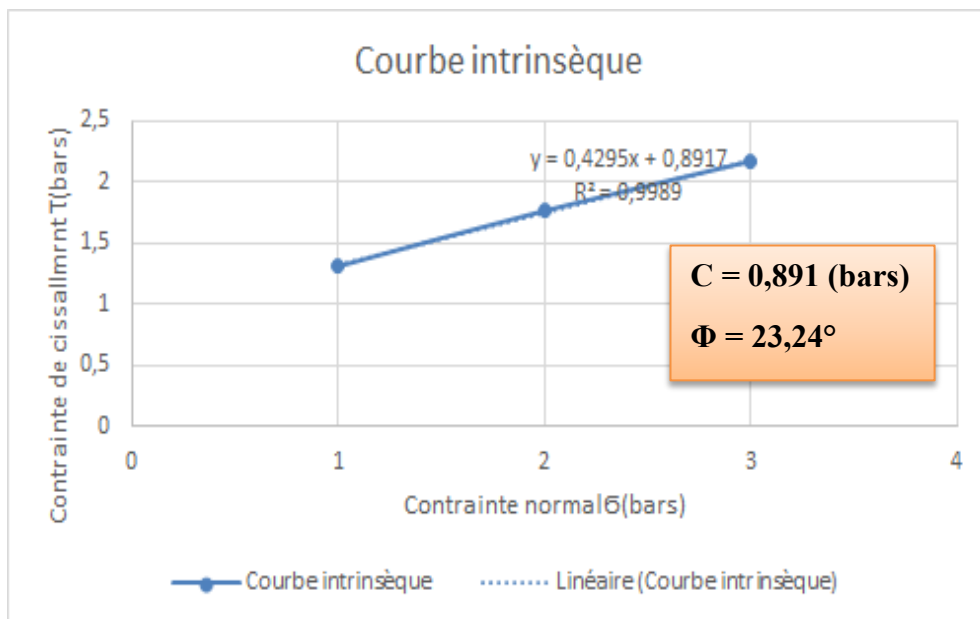


Figure 72. Courbe intrinsèque de cisaillement de l'échantillon d'argile avec ajout de **15%** de Caoutchouc



Figure 73. Comparaison entre les courbes intrinsèques de cisaillement de l'échantillon N°1 et de l'échantillon N°9

COMMENTAIRE 3 : Il y a une diminution très importante de frottement ($23.24^\circ - 34.95^\circ$) qui est dû au frottement de rajout caoutchouc et une augmentation de la cohésion (0.884 bars – 0.891 bars) d'une petite valeur ce que justifié la cohésion de mélange formé.

COMMENTAIRE GENERALE : pour diminuer l'angle du frottement d'une argile il suffit de rajouter des quantités du caoutchouc de l'ordre (de 5% à 15%) et à chaque fois quand augmente le pourcentage de rajout le frottement diminue rapidement par contre la cohésion diminue avec des faibles pourcentages des rajouts (de 5% à 10%) et quand je dépasse le pourcentage du 10% il y a une augmentation de la cohésion d'une manière considérable.

19.7 Conclusion :

Notre étude nous a montré que tous les argiles peuvent améliorer leurs caractéristiques mécaniques à savoir (C et Φ), dans notre cas d'étude on a conclu les trois points suivants :

- Pour avoir une argile très cohésive et frottante (matériaux granulaire) il suffit de rajouter le matériau verre avec des pourcentages de 5% à 15%, afin d'accélérer cette augmentation des caractéristiques mécanique il suffit de rajouter des pourcentages importants.
- Pour avoir une argile cohérente (matériaux très fin) il suffit de rajouter le matériau plâtre avec des pourcentages de 5% à 15%, afin d'accélérer cette augmentation des caractéristiques mécanique il suffit de rajouter des pourcentages importants.

- Pour avoir une argile très cohérente (matériaux fin) il suffit de rajouter le matériau caoutchouc avec des pourcentages de 5% à 15%, afin d'accélérer cette augmentation des caractéristiques mécanique il suffit de rajouter des pourcentages importants.

Référence

- [1] H. Mohamed., « Contribution à l'amélioration du procédé de fabrication de la céramique », Mémoire de magister, Faculté des sciences et sciences de l'ingénieur, Département de génie des procédés, Université Kasdi Merbah Ouargla, 2007.
- [2] Blatt, Harvey and Robert J. Tracy. Petrology: Igneous, Sedimentary, and Metamorphic, 2nd ed. Freeman, 1996.
- [3] Brindley, G. W., & Brown, G. (1980). Crystal structures of clay minerals and their X-ray identification. Mineralogical Society, London.
- [4] F. Villieras, 2008, page 16 P.
- [5] BRGM, Panorama du marché français des matériaux de carrière et produits dérivés, Rapport BRGM R40907, P127, 1 Ann, 2000.
- [6] P. Andrianne, 2003, page 46-48
- [7] P. Adrienne, 2003, page 48
- [8] Velde, B. (1995). Introduction to clay minerals: chemistry, origins, uses and environmental significance. Springer Science & Business Media.
- Grim, R. E. (1962). Clay mineralogy. McGraw-Hill.
- Moore, D. M., & Reynolds Jr, R. C. (1997). X-ray diffraction and the identification and analysis of clay minerals. Oxford University Press.
- [9] La norme ASTM C378-88 intitulée "Standard Test Method for Clay Lumps and Friable Particles in Aggregates"
- [10] BATOUCHE Khaled, « Inter calation de liquides ioniques dans les argiles », Mémoire de Magister, Université Mentouri Constantine », 2010.
- [11] N. Charles., S. Colin., T. Gutierrez., G. Lefebvre, « Mémento kaolin et argiles kaoliniques. », Rapport BRGM/RP-67334-FR, P93.44fig. 4tabl, 2018.
- [12] La norme ASTM D5890-16 intitulée "Standard Test Method for Swell Index of Clay Mineral Component of Geosynthetic Clay Liners"

- [13] La norme API SPEC 13A inclut des spécifications détaillées pour la bentonite.
- [14] DERAFA Garmia, « Synthèse et caractérisation de montmorillonite modifiée : Application à l'adsorption des colorants cationiques », Mémoire de Magister, Université Ferhat Abbas Sétif, 2014, p7, p13, p21.
- [15] D. M. Moore, R. C. Reynolds, 1989
- [16] J. Orcel, S. Caillère, S. Hénin, 1950, page 329-330
- [17] PEDROG, « Les minéraux argileux, Constituants et propriétés du sol » EDS DuchaufourPh, et SouthierB, Masson, Paris5p, MERINGJ On the hydration of montmorillonite, FaradaySoc .42B, 1994. 1946, pp205-219.
- [18] La norme ASTM C110-16, intitulée "Standard Test Methods for Physical Testing of Quicklime, Hydrated Lime, and Limestone"
- [19] Moore, D.M., Reynolds Jr, R.C., et al. (1997). X-ray Diffraction and the Identification and Analysis of Clay Minerals. Oxford University Press.
- [20] Atterberg, A. (1911). Die Plastizität der Tone. International Mitteilungen für Bodenkunde, 6, 1-17.
- [21] Casagrande, A. (1948). Classification and identification of soils. Transaction of the American Society of Civil Engineers, 113, 901-930.
- [22] Soil Survey Staff. (2014). Keys to Soil Taxonomy. USDA-Natural Resources Conservation Service.
- [23] P. Villieras, 2008, page 16
- [24] D. Merabet, H. Belkacemi, octobre 2003
- [25] N. Cousin, 2013, page 31
- [26] P. Ségalen, 1969, pages 225-236
- [27] M. Rautureau, S. Caillere et S. Henin : Les argiles. AGS, septima édition, 1989.
- [28] A. Meunier : Argiles. GB Science Publisher, éditions scientifiques gb édition, 2003.
- [29] "La formation et la présence de minéraux argileux dans les sols : une revue" Auteurs : JB Dixon, SB Weed Journal : Clay Minerals Année : 1989 Volume : 24 Numéro : 4 Pages : 295-311 DOI : 10.1180/claymin.1989.024.4.01

- [30] Mouanga, M. et al 2009.
- [31] Bitenc, M. et al 2012
- [32] Selon le manuel de référence "Clays and Clay Minerals: Properties and Formation Processes" de Joseph W. Stucki
- [33] Stucki, JW (1982). Argiles et minéraux argileux : propriétés et processus de formation. Développements en sédimentologie, 36. Elsevier.
- [34] O. Qabaqous et coll., 2014.
- [35] M. Salay., M. Lawan., « Développement et validation d'une méthode de dosage du diclofenac sodique par UV-Visible : Essais de décontamination par des adsorbants naturels, Thèse de doctorat, Fculte de medecine et de pharmacie, » Université Mohammed V -Souissi-RABAT-p20, 2013.
- [36] J.P Laffranque., N. Pollet., B. Garforth, Phytoma, 449, 49-51, 1993.
- [37] A. Areffas., « Etude de l'adsorption de colorants organique (Rouge nylosan et bleu de méthylène) sur des charbons actifs préparés à partir de marc de café, » Thèse de Doctorat, Université de Mentouri Constantine, p48, 2010.
- [38] S.Haddoum., S.Selatnia., « Biosrption du plomb sur biomasse,» Mémoire de magistère, Ecole nationale supérieure polytechnique, p28, 2005.
- [39] B.Meroufel-Zensani., « Adsorption des polluants organiques et inorganiques sur des substances naturelles : Kaolin, racines de Calotropis procera et noyaux de dattes. », Thèse de Doctorat. Autre. Université de Lorraine, p74, 2015.
- [40] O. Layaly., « Synthèse et caractérisation de matériaux magnétiques pour l'adsorption de polluants présents dans les eaux. », Thèse de Doctorat Chimie organique. Université Pierre et Marie Curie- Paris IV, 2014.
- [41] Guggenheim, S., Adams, J.M., Bain, D.C., Bergaya, F., Brigatti, M.F., Drits, V.A., Formoso, M.L.L., Galán, E., Kogure, T., Stanjek, H., Uguna, C.N. and Zezza, F. (2006). (AIPEA) nomenclature committee for 2006. Clays and Clay Minerals, 54(6), 761-772.

- [42] Velde, B. (1995). *Origin and mineralogy of clays: Clays and the environment*. Springer Science & Business Media.
- [43] Murray, H. H. (2007). *Applied clay mineralogy: Occurrences, processing, and application of kaolins, bentonites, palygorskite-sepiolite, and common clays*. Elsevier.
- [44] Moore, D. M., & Reynolds Jr, R. C. (1997). *X-ray diffraction and the identification and analysis of clay minerals*. Oxford University Press.
- [45] Jeans, C. V. (1989). Eslinger E. & Pevear D. 1988. *Clay Minerals for Petroleum Geologists and Engineers*. SEPM Short Course Notes no. 22. ix+ 405 pp. Tulsa: Society of Economic Paleontologists and Mineralogists. Price US \$33.00 (paperback). ISBN 0 918985 000. *Geological Magazine*, 126(3), 324-324.
- [46] Kumar, P. S., Abhinaya, R. V., Lashmi, K. G., Arthi, V., Pavithra, R., Sathyaselvabala, V., ... & Sivanesan, S. (2011). Adsorption of methylene blue dye from aqueous solution by agricultural waste: Equilibrium, thermodynamics, kinetics, mechanism and process design. *Colloid journal*, 73(5), 651-661.
- [47] Venkat Mohan, S., Krishna Mohan, S., & Karthikeyan, J. (2000). Adsorption mechanism of acid-azo dye from aqueous solution onto coal/coal based sorbents and activated carbon: A Mechanist Study. *Analytical techniques in Monitoring the Environment*. Tirupathi, India, Student Offset Printers.
- [48] Dali-Youcef, Z., Bouabdasselem, H., & Bettahar, N. (2006). Élimination des composés organiques par des argiles locales. *Comptes Rendus Chimie*, 9(10), 1295- 1300
- [49] Célini, N. (2004). *Traitement des argiles par plasma froid pour leur utilisation comme charges de nano composites argile-polymère* (Doctoral dissertation, Thèse de doctorat Ph. D soutenu en à l'Université du Maine Faculté des Sciences UMR CNRS 6120 Polymères, Colloïdes, Interfaces).
- [50] (en) Ludovic Berthier et Mark D. Ediger, « Facets of glass physics », *Physics Today*, vol. 69, n° 1, janvier 2016, p. 40-46 (DOI 10.1063/PT.3.3052, lire en ligne [archive], consulté le 12 avril 2022).
- [51] « Glass." *Encyclopædia Britannica*, Encyclopædia Britannica, Inc., 7 Feb. 2017,
- [52] Cnrtl, verre, définition [archive] « maison de verre [égale] information ouverte et disponible ».
- [53] « Jerzy Zarzycki » [archive] (consulté le 15 mars 2018).
- [54] Jerzy Zarzycki, *Les verres et l'état vitreux*, Masson, 1982, 391 p. (ISBN 978-2-225-69036-5).
- [55] (en) Ludovic Berthier et Mark D. Ediger, « Facets of glass physics », *Physics Today*, vol. 69, n° 1, janvier 2016, p. 40-46 (DOI 10.1063/PT.3.3052, lire en ligne [archive], consulté le 12 avril 2022).

- [56] (en) Stephen F. Swallen, Kenneth L. Kearns, Marie K. Mapes, Yong Seol Kim, Robert J. McMahon *et al.*, « Organic Glasses with Exceptional Thermodynamic and Kinetic Stability », *Science*, vol. 315, n° 5810, 19 janvier 2007, p. 353-356 (DOI 10.1126 / science .1135795).
- [57] Matsuda, KM, Glasser, LA La structure des verres inorganiques. Springer, 2002.
- [58] Popescu, M. A. ; Science, S.-S. Et Library, T. (éds.), Non-Crystalline Chalcogenides Kluwer, Academic Publishers, 2000
- [59] En verre sodique avec le « natrium », originaires de l'est du bassin méditerranéen, elles ont été refondues, réutilisées et deviennent rares après la période vi^e siècle où se rompent les circuits commerciaux. Sophie La Gabrielle, Stéphane Palaude, Yves-Marie Adrian et Emmanuel Laurentin, *La Fabrique de l'Histoire, Les révolutions du verre*, France Culture, 26 juin 2019.
- [60] Des ouvrages sous haute surveillance, Les dossiers de la recherche, n° 48, avril 2012, Cahiers technologiques, p. 86-87
- [61] A day made of glass 2, une nouvelle vision du futur [archive], sur nowhereelse.fr
- [62] Morton, M. (2005). Technologie du caoutchouc. Presse Smithers Rapra.
- [63] Meehan, RT (2017). L'hévéa : un guide de terrain. Plate-forme de publication indépendante de Createspace.
- [64] En ligne Rath, S. (2013). Caoutchouc : un guide technique illustré pour les petits exploitants. Institut de recherche sur le caoutchouc du Nigéria.
- [65] OULD-HENIA Mehdi. Modélisation et prédiction du comportement rhéologique des mélanges bitume-caoutchouc. Thèse de Doctorat, Lausanne : Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne 2005.
- [66] DONY Anne, and DURRIEU F., "Caractérisation des bitumes-polymères : Effet du mode de préparation des éprouvettes sur les résultats d'essai." BULLETIN DE LIAISON DES LABORATOIRES DES PONTS ET CHAUSSEES 175 (1991).
- [67] BERTHIER Jean. Projet et construction de routes. Lien : <http://197.14.51.10:81/pmb/GENIE%20CIVIL/TECHNIQUES%20PARTICULIERES/c5500.pdf> consulté le 01/05/2017.
- [68] « Étanchéité, amortissement, transport – le caoutchouc synthétique fête ses 100 ans » [archive], un article Culture Sciences-Chimie de l'École normale supérieure-DGESCO.
- [69] S. Palu et D. Ploch, « Du caoutchouc naturel en Europe » [archive], *Pour la science*, août 2010.

[70] Zied Marzougui, « Élaboration de Latex magnétique fonctionnalisée pour le traitement des eaux usées par adsorption » [archive] [PDF], *Polymères*, 2016, université de Lyon, thèse en cotutèle de l'université de Sfax et Claude Bernard Lyon 1, 189 p.

[71] La norme ASTM D2227 fournit des spécifications pour les différentes classes techniques de caoutchouc.

[73] Benguella, B. (2009). Valorisation des argiles Algériennes application à l'adsorption des colorants textiles en solution (Doctoral dissertation, Thèse de Doctorat de l'Université de Tlemcen).

