

*République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université A/ Mira, - Bejaïa – Faculté de Technologie
Département de Génie Civil*

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

En vue de l'obtention du diplôme de Master en Génie Civil

Option : Structures



Thème :

***Influence de la substitution d'argile par les
poussières de four à ciment***



*Encadré par :
Dr BOUZEROURA. M*

*Présenté par :
Melle CHAFA Selma
Melle BOUCHETA Feriel*

Devant le jury :

Dr Arezki.S
Dr Meziani.M

Soutenue Le :0 1/ 0 9 /2020

Remerciement

Nous tenons à remercier en premier lieu Dieu de nous avoir données de courage, et surtout la patience et la volonté.

Nous adressons nos sincères remerciements à notre promoteur M^r BOUZEROURA Mansour de nous soutenir et aidé malgré les difficultés causées par ce virus (COVID-19), pour nous avoir dirigés de loin et pour ses réponses rapides aux e-mails.

Et nous remercions d'avance les membres de jury qui ont bien voulu honorer notre travail en l'examinant.

CHAFA Selma
BOUCHETA Feriel

Dédicaces

Je ne cesserai de dire que la science représente l'investissement éternel, elle est un rempart contre l'ignorance et une essence à travers laquelle les peuples y puisent leurs énergies.

Lue ce modeste travail puisse être une entité dans ce monde qu'on appelle "Savoir", et une récompense d'un long labeur fait de sacrifices et de peines.

Ma pensée va plus particulièrement à ma mère qui a consenti à sacrifier toute sa vie pour me voir grandir et finir mes études, à mon père qui a fait preuve de patience et à qui je dois beaucoup dans l'instruction que j'ai reçue, ainsi à mes sœurs Linda, Daila, Amira, Katia, Kamilia et Racha qui m'ont soutenues et pour leurs patiences dans ce confinement malgré ma nervosité, et mes copines qui m'ont tout le temps encouragé en particulier à MENARI Mélissa Sonia et la réalisation de ce mémoire.

Ce travail je le dédie à ma famille, plus particulièrement à ma mère « CHAFFA Zohra ».

A ma promo, je vous souhaite 2020 sana saida.

Et pour finir je dirai :

- ✓ Vue la vie est réellement obscurité sauf là où il y a élan*
- ✓ Et tout élan est aveugle sauf là où il y a savoir*
- ✓ Et tout savoir est vain sauf là où il y a travail*
- ✓ Et tout travail est vide sauf là où il y a amour*
- ✓ Et lorsque vous travaillez avec amour, vous vous liez à vous-même et à dieu.*

CHAFA Selma

Dédicaces

J'offre ce modeste travail :

A mes chers parents

Aucune dédicace ne pourra faire témoin de mon profond amour, mon immense gratitude et mon plus grand respect à votre égard. Je n'oublierai jamais la tendresse dont vous m'avez entourés depuis mon enfance. Que DIEU vous protège.

A toute ma famille, pour leur soutien moral. A tous mes amis et à tout ceux que j'aime et à toutes les personnes qui m'ont encouragé.

A mes chers enseignants sans exception.

A tous les étudiants de GENIE CIVIL.

BOUCHETA Ferial.

LISTE DES ABRÉVIATIONS ET SYMBOLES

CEM I : Ciment Portland I

CKD : Cerment Kiln Dust (Poussières de four de cimenterie)

E/C : Eau/Ciment

MgO : Magnésium

CaO : chaux

SiO₂ : Silice

CaOH₂ : Portlandite

CaCO₃ : Calcite

Ca₂SiO₄ : Arnite

Ca₃Al₂OH₁₂ : Ettringite

CaMg(CO₃)₂ : Dolomite

C-S-H : Silicates de calcium hydratés

C₃S : Silicate tricalcique

C₂S : Silicate bicalcique

C₃A : Aluminate tricalcique

A : Coefficient d'activite

ASTM: American Society for Testing and Material

NIST : National Institut of Standards & Technologie

Résumé

En raison de la pandémie (COVID-19) notre travail s'est résumé uniquement sur une recherche bibliographique élargie.

Dans ce travail, nous avons étudié la possibilité d'utiliser la poussière de four de cimenterie (déchet solide généré par le four de cimenterie CKD) comme ajout dans les Argiles.

Afin de cerner l'objectif recherché, notre étude s'est basé sur la substitution de l'argile par différents pourcentages de CKD en vue d'atteindre les objectifs suivants :

- Minimiser l'émission de CO₂ dans l'atmosphère et la charge de la CKD tout en élaborant un nouveau liant hydraulique avec des propriétés physico-chimique et mécaniques améliorée.
- Gagner un pourcentage d'énergie et de matières premières consommées.
- L'influence de la substitution sur les caractéristiques physico-chimiques et les propriétés physiques de l'argile ainsi que le comportement mécanique a été recherché.

Les résultats obtenus nous ont montré que la finesse de l'argile à base de CKD et la quantité d'eau de gâchage augmentent en fonction du pourcentage de notre ajout. Le temps de prise diminue avec l'accroissement du pourcentage de la CKD.

A partir des résultats obtenus, on peut conclure que, la substitution des CKD dans les pâtes d'argile peut être favorable pour une substitution inférieure à 5%.

Mots clés : argile ; poussière de four à ciment (CKD) ; formulations ; Substitution ; résistance.

Abstract

Due to the pandemic (COVID-19) our work had been summarized only through an expanded bibliographical research.

In this work, we investigated the possibility of using cement kiln dust (solid waste generated by the CKD cement kiln) as an addition to the Clay.

In order to identify the desired objective, our study was based on the substitution of clay by different percentages of CKD in order to achieve the following objectives:

- Minimize CO₂ emission in the atmosphere and the CKD load while developing a new hydraulic binder with improved physico-chemical and mechanical properties.
- Gaining a percentage of energy and raw materials consumed.
- The influence of substitution on the physico-chemical characteristics and physical properties of the clay as well as the mechanical behaviour was investigated.

The results obtained have shown us that the fineness of the CKD-based clay and the quantity of mixing water increase according to the percentage of our addition.

The setting time decreases as the percentage of CKD increases.

From the results obtained, we can conclude that the substitution of CKD in clay pastes can be favourable for a substitution lower than 5%.

Key words: clay; cement kiln dust (CKD); formulations; substitution; resistance.

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE.....	2
1 CHAPITRE I : RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE (ciment et CKD)	6
1.1 INTRODUCTION :	6
1.2 GENERALITES :	6
1.2.1 Historique de Ciment :	6
1.3 Définition de ciment :	7
1.4 Procèdes de la fabrication du ciment :	7
1.4.1 Linge de fabrication du cru:	8
1.4.2 Ligne de cuisson:.....	8
1.4.3 Ligne de fabrication du ciment :	8
1.5 Voies de traitement du mélange:	9
1.5.1 Voie sèche et semi-sèche :	9
1.5.2 Voie Humide :	9
1.5.3 Voie Semi humide :	9
1.6 Les ciments courants selon la norme NF EN 197-1:.....	9
Composer de 5 à 95% du clinker + < 5% du gypse + de 0 à 95% d'éventuels ajouts.....	9
1.7 Les poussières de four à ciment :	10
1.7.1 Définition des poussières de four à ciment (PFC) :	10
1.7.2 Composition chimique des CKD :	12
1.7.3 Composition minéralogique des CKD :	12
1.7.4 Variabilités chimique et minéralogique des CKD :	13
1.1.1.....	13
1.1.2.....	13
1.1.3.....	13
1.1.4.....	13
1.7.4.1 Classification des CKD :	13
1.1 L'utilisation des CKD :	15
1.1.1 Stabilisation des CKDs avec ajout minéral :	15
1.1.2 Stabilisation des sols par ajout des CKDs :	16
1.1.3 Stabilisation des CKD comme barrière hydrogéologique :	16
1.1.4 Ajout des CKD dans le béton :	18
CHAPITRE II	19
RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE (L'Argile).....	19
2 CHAPITRE II : RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE (L'Argile).....	20

2.1	Introduction :	20
2.2	L'historique :	20
2.3	Généralités :	21
2.3.1	Définition de l'argile :	21
2.3.2	Origine :	22
2.3.3	L'argile et cycle géologique :	22
2.4	Minéraux argileux :	23
2.4.1	L'organisation structurale des phyllosilicates :	23
2.4.2	Types structuraux et classification des argiles :	24
2.4.2.1	La kaolinite :	27
2.4.2.2	L'illite :	28
2.4.2.3	Les smectites :	28
2.4.2.4	Les chlorites :	29
2.5	Propriétés physico-chimiques des argiles :	29
2.5.1	Plasticité :	29
2.5.2	Forme et surface spécifique :	29
2.5.3	Degré d'hydratation :	30
2.5.4	Description de la séquence de gonflement :	31
2.5.5	Capacité d'échange cationique :	31
2.6	Forces existantes entre les particules argileuses :	32
2.7	Applications des matières argileuses :	32
CHAPITRE III.....		33
PROTOCOLES EXPERIMENTAUX.....		33
3	CHAPITRE III : PROTOCOLES EXPERIMENTAUX.....	34
3.1	Introduction :	34
3.2	Limite d'Atterberg :	34
3.2.1	Principe :	34
3.2.2	Matériel utilisé :	36
3.2.3	Mode opératoire de l'essai :	36
3.3	LES CARACTERISTIQUES MECANIQUE :	39
3.3.1	Préparation des éprouvettes :	39
3.3.1.1	Mode opératoire :	39
3.3.1.2	Confection des éprouvettes :	39
3.3.2	Essai de rupture par flexion :	42
3.3.3	L'essai de compression :	43
3.3.4	Essai de retrait:	44

3.3.4.1	Matériel utiliser :	45
3.3.4.2	Mode opératoire :	46
3.3.5	Essais de masse volumique :	47
3.3.5.1	Principe:	47
L'essai consiste à mesurer successivement les paramètres masse et volume qui caractérise un même échantillon de sol.		
3.3.5.2	Mode opératoire:	47
3.3.6	Essais de porosité :	48
3.3.6.1	Mode opératoire :	48
3.3.7	Essai de conductivité thermique :	48
3.3.7.1	Essais de détermination de conductivité thermique de l'argile :	48
3.3.8	Degré d'humidité:	49
3.3.8.1	La capacité de rétention d'eau:	49
3.3.8.2	Teneur en humidité (%) [72] :	50
3.4	Conclusion:	50
4	CHAPITRE IV SYNTHESE DES RESULTATS	52
4.1	Introduction :	52
4.2	Résultats de l'essai des limites d'atterberg :	52
4.2.1	Limite d'atterberg de l'argile : (Norme NF P 94-051) [59] :	52
4.2.1.1	Classification des argiles selon Atterberg :	53
4.2.2	limite d'Atterberg de l'argile+ CKD :	53
4.3	Résultats des essais de flexion et compression :	55
4.4	Résultats des essais de la masse volumique apparente :	57
4.5	Résultats de l'essai de degré d'humidité :	57
4.6	Conclusion	58
CONCLUSION GENERALE.....		
5	CONCLUSION GENERALE	61

Figures

Figure1 1 : Procèdes de la fabrication du ciment[4]	8
Figure1 2 :Schéma de voies de fabrication du ciment.	9
Figure1 3 : Schéma du cycle des matières volatiles dans le four [76].....	11
Figure1 4: Variabilité chimique des poussières Alpena dans le temps [12]	14
Figure2 1: structure d'une argile. [23]	22
Figure2 2: Représentation schématique du cycle des argiles dans la croûte continentale (d'après R.J. Merriman, 2005)[25]	23
Figure2 3: Représentation de la couche tétraédrique (Morel, 1989).....	24
Figure2 4: Représentation de la couche octaédrique (Morel, 1989).....	24
Figure2 5: Caractéristiques des différentes familles d'argile [28].....	25
Figure2 6: Structure des minéraux inter stratifiés	26
Figure2 7: Schéma de la particule de a) kaolinite, b) illite, c) smectite et d) chlorite	27
Figure2 8: Modèle structural de kaolinite, a- feuillet tétraédrique, b- octaèdre les atomes coordonnés peuvent être Al, Fe ou Mg, c- feuillet octaédrique, d- modèle schématique de la couche de kaolinite (Celso and al., 1998). [23]	28
Figure2 9: La structure de l'illite montre des feuillets composés d'une couche octaédrique liée à deux couches tétraédriques. [23].....	28
Figure2 10: La structure du chlorite se caractérise par la présence d'une couche octaédrique interfoliaire.	29
Figure2 11: Influence de la forme de la particule sur la surface spécifique.[35]	30
Figure2 12: Localisation de l'eau dans les particules argileuses (a) Molécules d'eau adsorbées sur la surface d'argile ; (b) Molécules d'eau associées avec les cations dans l'espace interfoliaire ; (c) Eau cristalline sous forme d'hydroxyle qui par des hydroxylati	31
Figure3 1: Limite de consistance. [38].....	34
Figure3 2: Déterminations des limites de plasticité et liquidité. [38]	35
Figure3 3: Diagramme représentant l'appareil de limite de liquidité de Casagrande et l'instrument pour entailler : les mesures sont indiquées en millimètres. [39]	36
Figure3 4: b) Ouverture de l'entaille au début de l'expérience ; c) Ouverture après un nombre de chutes suffisant pour refermer l'entaille sur 13 mm (D'après Hansbo, 1975).....	38
Figure3 5: Rouleaux à la limite de plasticité. (Photographies de M.Surenda).[39]	38
Figure3 6: Le moule 4*4*16 (laboratoire génie mécanique université Bejaia). [44].....	40
Figure3 7: Briques crues laboratoire génie civil université Bejaia). [44]	41
Figure3 8: Appareil de la résistance à la flexion (laboratoire génie civil université Tizi Ouzou). [44]	43
Figure3 9: Appareil de la résistance à la compression (laboratoire génie civil université Tizi Ouzou). [44]	44
Figure3 10: Détermination effective de la limite de retrait sur un échantillon non remanié selon XP. P 94-060-2 [51].....	45
Figure3 11: Dispositif pour l'essai de retrait (XP P 94-060-2) [48]	46
Figure4 1: Abaques de CAZAGRANDE de l'argile.	52
Figure4 2: Effet du traitement de la poussière du four sur la limite de liquide, la limite de plastique et l'indicateur de plasticité de la bentonite. [62].....	55
Figure4 3: Développement des résistances à la compression (a) et à la flexion (b) des mortiers activés par les alcalis avec différentes quantités de CKD. [63]	56
Figure4 4: Résistance à la compression de la kaolinite traitée avec de la poussière de four et durcie pendentif 2, 7 et 28 jours. [62].....	56
Figure4 5: Courbes de compactage Proctor standard de la kaolinite traitée avec de 6,12 et 30% de poussière de four. [62]	57

Tableaux

Tableau1 1 : Exigences chimiques définies en termes de valeurs caractéristiques des ciments courants. [1]	10
Tableau1 2 : Analyse Chimique Des CKD Étudiées par le bureau[9]	12
Tableau1 3 : Teneurs moyennes des éléments en traces dans les CKD[10]	12
Tableau1 4: Intervalle de la variation minéralogique des CKD [10]	13
Tableau2 1: Principaux types des minéraux argileux.[30]	26
Tableau2 2: Surface spécifique des particules argileuses [34]	30
Tableau3 1: compacité des sols granulaires en fonction de leur indice de densité. [38]	35
Tableau3 2: Classification des argiles selon leur activité [38]	36
Tableau3 3: Barème du critère géotechnique suivant le retrait. [50]	45
Tableau4 1: Résultats d’essais de limites d’Atterberg. [60]	53
Tableau4 2: Classification des argiles selon Atterberg. [60]	53
Tableau4 3: Résultats d’essais de limites d’Atterberg pour argile non traité. [61]	53
Tableau4 4: Analyse chimique de la poussière de four et de la kaolinite pure. [62]	54
Tableau4 5: Caractéristiques physico-chimiques du sol à différents endroits et à différentes profondeurs (saison des pluies) à Shree cement Ltd. Beawar (Ajmer). [69]	58

Introduction

Générale

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE :

L'argile est l'un des matériaux les plus anciens utilisé par l'être humain. Ce matériau était souvent présent au voisinage d'eau. En fait, dans l'histoire de la planète, l'argile a largement précédé l'homme qui a mis en valeur ses nombreuses et utiles propriétés. Si on considère que la vie a progressivement pris naissance dans les zones humides alors même que l'argile naissait de l'action destructrice de l'eau sur les roches, il est légitime de penser qu'une « relation privilégiée » a pu se développer tout au long de cette histoire commune entre les organismes vivants et le milieu minéral très particulier des argiles. [21]

L'argile, matériau familier universellement utilisé, est restée scientifiquement très mal connue jusqu'à une époque récente, tout simplement parce qu'elle est formée de particules de très petites dimensions. Lors des premières études scientifiques, cette matière minérale s'est avérée être « formée de particules élémentaires dont les dimensions, en règle générale, sont inférieures à deux micromètres ». Leur taille nanométrique et leur structure en feuillet offre une grande surface spécifique. L'étude de sa réaction est un enjeu majeur en science de l'environnement, avec de grands bénéfices, tant au niveau de base appliqué, en particulier dans la gestion et la protection des ressources naturelles. [5]

Dans le but de valoriser des déchets minéraux comme les poussières de four à ciment, nous nous sommes intéressés à les ajouter au argile pour obtenir des produits finis moins coûteux et de grande résistance. L'originalité de ce travail réside dans l'utilisation de matériaux peu coûteux, abondant et dans l'objectif d'obtenir une meilleure formulation et de suivre l'amélioration des propriétés de rapport argile/CKD (la stabilisation et la consolidation de l'argile).

Les déchets industriels constituent l'un des problèmes majeurs actuels, d'un point de vue environnemental, c'est le traitement des grands volumes de déchets produits en continu par les activités industrielles et urbaines. On estime que la quantité de déchets produits dans le monde peut atteindre des centaines de milliards de tonnes. La plupart de ses déchets sont produits par les industries des pays développés (États-Unis, Canada, Chine, pays de l'Union européenne, etc.). Ces quantités de déchets ne cessent d'augmenter et atteindront des niveaux plus élevés dans les années à venir.

Parmi ces activités productrices de déchets, on cite les cimenteries ont été amenées à produire des résidus industriels comme les poussières de four de cimenterie connues sous la

INTRODUCTION GENERALE

dénomination de (Cement Kiln Dust (CKD)), à cause d'augmentation de la production de ciment.

Les déchets industriels ne peuvent être considérés seulement comme un déchet mais plutôt comme un sous-produit ou des dépôts d'un ou plusieurs éléments de valeur commerciale. Cette alternative revêt de nos jours une solution environnementale très prometteuse, et connaît un engouement important sachant les différents incitatifs en termes de la diminution de l'utilisation exhaustive des ressources naturelles non renouvelables (argiles, sable...etc) dans le domaine des matériaux de construction. Plusieurs voies de valorisation avec des prétraitements plus ou moins complexes des déchets solides ont été évaluées.

Ces poussières sont un mélange de particules de farine crue partiellement calcinée et qui n'a pas réagi, de poussières de clinker et de cendres, enrichies avec des sulfates alcalins, des halogénures et autres matières volatiles. Ces particules sont capturées par les gaz d'échappement et recueillies dans des dispositifs de contrôle de particules tels que les cyclones, filtres à manches ainsi que les précipitateurs électrostatiques.

On utilise les poussières de four dans plusieurs domaines tel que stabilisation et consolidation de sols argileux ; stabilisation de déchets ; additif pour le ciment ; régénération de mines ; additif pour sol agricole ; enfouissement de décharges ; matériel de couverture ; neutralisation des eaux usées ; fabrication de pavement ; produits en béton.

Cette voie permet une réduction importante des volumes de déchets, une stabilisation physique et chimique des polluants toxiques et/ou une valorisation de déchets en matériaux utiles. On a choisi de valoriser les déchets industriels (CKDs). Dans cette étude, le déchet a été examiné pour son potentiel de valorisation dans l'argile. Ce déchet provient essentiellement de l'industrie de la fabrication des ciments.

Nos objectifs à travers cette recherche sont l'étude de la valorisation des argiles par ajout des poussières de four à ciment (CKD).

Notre projet de fin d'étude est divisé en 4 chapitres qui sont réparties comme suit :

- Dans le premier chapitre, nous présenterons une recherche bibliographique sur le ciment et les étapes de sa fabrication aussi sur les CKD et leurs composition chimique et minéralogique et son influence environnementale.

INTRODUCTION GENERALE

- Dans le deuxième chapitre, nous présenterons une recherche bibliographique Sur les argiles leurs composition chimique et minéralogique et aussi leurs utilisations dans différents domaines et les étapes de fabrication de la pâte d'argile.
 - Dans le troisième chapitre, nous allons le consacrer à la partie expérimentale en présentant la caractérisation des matériaux et les formulations adoptées. Ensuite, nous décrirons les différentes techniques d'analyses employées pour évaluer l'effet de la substitution des CKD sur les propriétés physiques et mécaniques des formulations étudiées.
 - Dans le quatrième chapitre, nous présenterons les résultats obtenus lors de la Campagne expérimentale, les argiles renforcées de CKD que nous allons les comparés à la pâte d'argile pure.
- Enfin, nous terminerons cette étude de recherche par une conclusion qui rappelle les objectifs et les principaux résultats obtenus pour améliorer certaines approches.

Chapitre I

Recherche bibliographique

(Ciment + CKD)

1 CHAPITRE I : RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE (ciment et CKD)

1.1 INTRODUCTION :

Ce chapitre examine d'abord la recherche bibliographique et les commentaires sur les connaissances de la fabrication du ciment, puis présente les concepts de base des CKD et sa valeur dans les matériaux en ciment ainsi que leur composition chimique, minérale et leur utilisation dans différents domaines (Zone et son impact environnemental).

1.2 GENERALITES :

1.2.1 Historique de Ciment :

Le mot ciment vient du latin « coementum », qui signifie mortier, liant des maçonneries Il y a plus de 2000 ans, les Grecs savaient déjà fabriquer du liant hydraulique en faisant réagir de la "chaux éteinte" $[Ca(OH)_2]$ et des cendres volcaniques, Les Romains se servirent beaucoup de la chaux dans leurs constructions. [1]

L'histoire du ciment moderne a commencé en 1756 en Angleterre par John Smeaton qui a découvert que les chaux qui présente les meilleures propriétés hydrauliques sont celles contenant des matières argileuses [2], pour l'obtenir d'un mortier solide, en mélangeant celle-ci avec des pozzolanas. [3]

En 1796, James Paker en Angleterre, qui a développé le ciment prompt qu'il baptise commercialement « Ciment Romain » [1], en calcinant certains agissements naturels de calcaires argileux. [2]

En 1813, Louis Vicat en France, étudiant scientifiquement et non plus empiriquement, découvrit les principes chimiques des ciments et définit leurs règles de fabrication en est-il considéré comme l'inventeur [3], il a publié ses travaux « Recherches Expérimentales sur les Chaux de Construction ». [1] Souligne le rôle de l'argile et fabrique un ciment à partir d'un mélange intime de calcaire et argile. [2]

En 1818, Maurice St. Leger a proposé un brevet pour la fabrication de la chaux artificielle. Ces découvertes ont réussi. [1] En 1824, en Angleterre, Joseph Aspdin fabrique et brevète la chaux hydraulique qui lui donne le nom de « Ciment Portland » à cause de sa couleur qui ressemble à la pierre de Portland. [2]

En 1835, Issac-Charles Johnson, qui travaille dans une cimenterie, note que les morceaux très cuits donnent le meilleur ciment après le broyage, il augmente la température de combustion et génère ainsi du vrai ciment Portland. [2]

La composition chimique du ciment était détectée par Henri Le Chatelier dans sa thèse de doctorat en 1887. [1]

1.3 Définition de ciment :

Le ciment appartient à la catégorie des liants hydrauliques, c'est-à-dire ces matériaux qui au contact de l'eau forment des pâtes capables de durcir progressivement, en formant des blocs compacts et résistants à l'action de l'eau, avec des résistances mécaniques importantes. [4]

Le composant principal du ciment est le **clinker** Portland, il est obtenu par calcination, à haute température ($\approx 1450^\circ\text{C}$) dans un four rotatif, d'un mélange fixé avec précision de matières premières finement broyées (80% roches calcaires et 20% d'argiles appelé le « cru »). Le mélange, une fois cuit, subit un refroidissement brutal à l'air.

Le ciment Portland de type I (CEM I) est constitué au minimum de 95% de clinker et peut contenir jusqu'à 5% d'ajouts. [5] Le clinker est constitué de 4 phases minérales majoritaires :

-L'alite C_3S : $(\text{CaO})_3(\text{SiO}_2)$

-La bélite C_2S : $(\text{CaO})_2(\text{SiO}_2)$

-L'aluminate de calcium C_3A : $(\text{CaO})_3(\text{Al}_2\text{O}_3)$

-Le ferro-aluminate de calcium C_4AF : $(\text{CaO})_3(\text{Al}_2\text{O}_3)(\text{Fe}_2\text{O}_3)$.

1.4 Procèdes de la fabrication du ciment :

Pour fabriquer du ciment, il faut réunir quatre éléments principaux selon des dosages préétablis : la chaux, la silice, l'alumine, l'oxyde de fer. L'élément prépondérant étant le calcaire, La cimenterie est d'ailleurs implantée à proximité d'un important gisement de cette matière. L'ensemble de ces éléments, appelé cru.

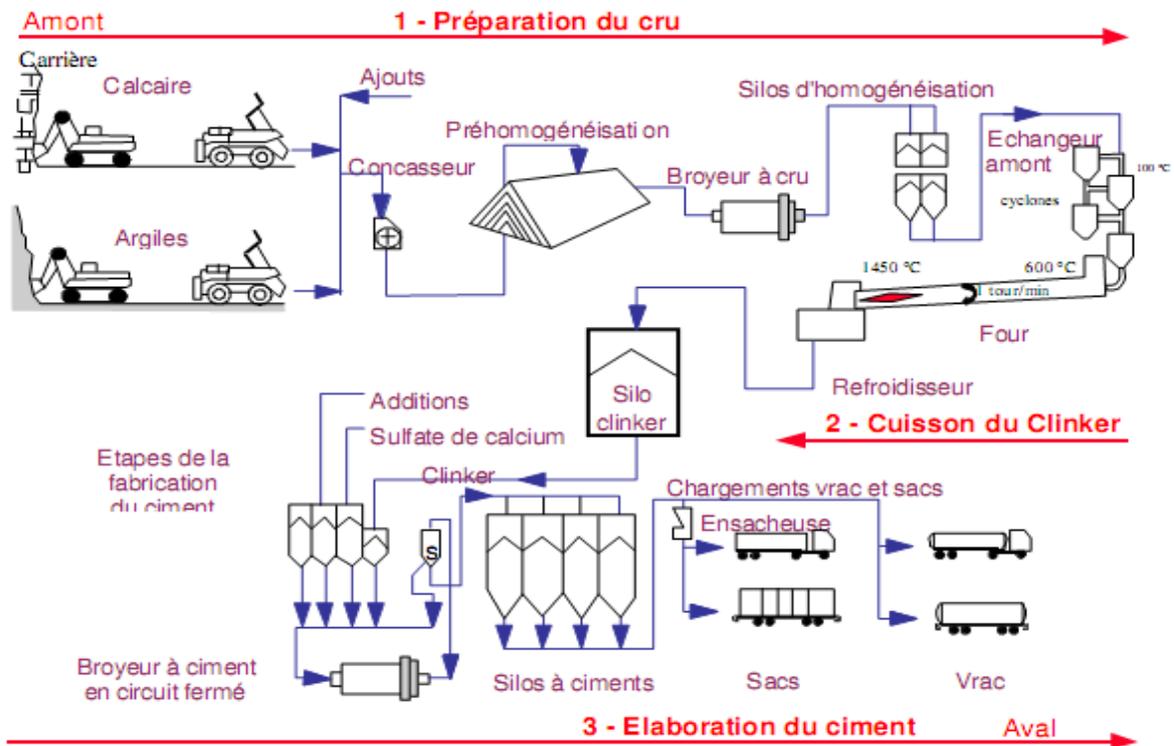


Figure 1 1 : Procèdes de la fabrication du ciment[4]

La fabrication du ciment se fait selon un procédé en continu, successivement et en parallèle les 3 ligne suivant :

1.4.1 Ligne de fabrication du cru:

Cette ligne commence depuis carrière on fait l'extraction des matériaux bruts (calcaire + argile), après transporter le calcaire vers les rôles de concassage pour réduire cette roche a une taille de 80 mm, ensuite on passe au prés homogénéisation et broyage pour obtenir **une farine très fine** et stocker le cru.

1.4.2 Ligne de cuisson:

D'abord on commence par le préchauffage pour ne pas bruler la farine, après on passe à la cuisson qui se fait dans un four rotatif à la sortie de four en fait tremper le mélange pour obtenir **le clinker**, on finit par le stockage du clinker.

1.4.3 Ligne de fabrication du ciment :

On commence par le dosage c'est à dire on ajoute au clinker le gypse et les constitutions secondaire, on les broie très finement pour obtenir **le ciment** et le stocker ensuite conditionnée et expédiés.

1.5 Voies de traitement du mélange:

1.5.1 Voie sèche et semi-sèche :

Dans la voie sèche et semi-sèche, elles sont broyées en poudre fine et séchées principalement à l'aide des gaz chauds du four et/ou de l'air d'exhaure du refroidisseur. Un four auxiliaire peut être nécessaire pour fournir le complément de chaleur nécessaire si les matières premières contiennent une forte proportion d'humidité et pour le démarrage du four.

1.5.2 Voie Humide :

La farine crue est transformée en pâte liquide par ajout d'eau puis broyage et malaxage avant d'être introduite directement dans un four qui sera alors plus long (jusqu'à 200 m).

1.5.3 Voie Semi humide :

La pâte est d'abord débarrassée de son eau dans des filtres-presses. Le gâteau de filtre-presse est ensuite extrudé sous forme de granules et introduit dans un préchauffeur à grilles ou directement dans un sécheur pour la fabrication du cru.

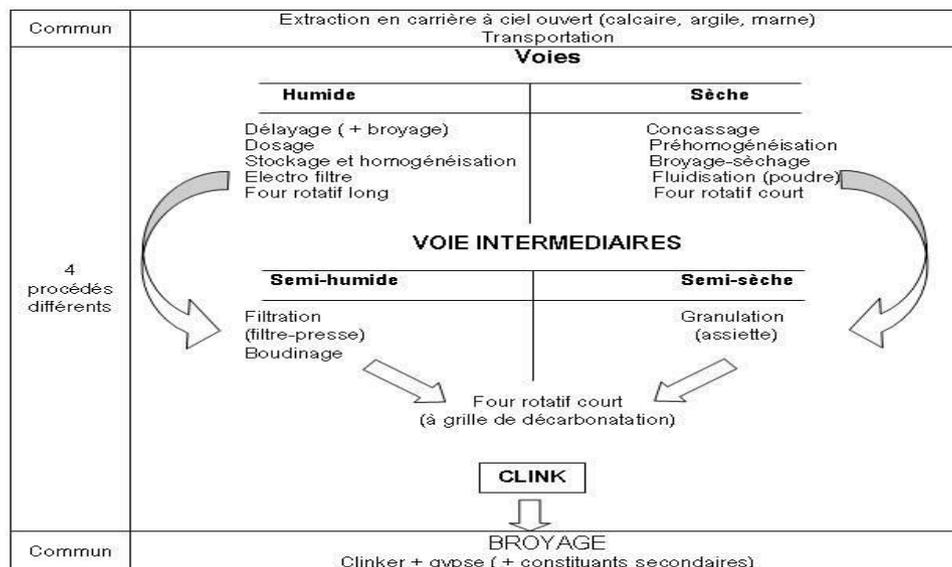


Figure 2 : Schéma de voies de fabrication du ciment.

1.6 Les ciments courants selon la norme NF EN 197-1:

Composer de 5 à 95% du clinker + < 5% du gypse + de 0 à 95% d'éventuels ajouts

Tableau 1 : Exigences chimiques définies en termes de valeurs caractéristiques des ciments courants. [1]

Propriétés	Type de ciment	Classe de résistance	Valeur maximale
Perte au feu	CPA-CEM I CHF-CEM III CLK-CEM III	Toutes les classes	≤ 5
MgO	CPA-CEM I	Toutes les classes	≤ 5
Résidu insoluble	CPA-CEM I CHF-CEM III CLK-CEM III	Toutes les classes	≤ 5
SO ₃	CPA-CEM I ET CPJ-CEM II (*)	32.5 32.5R 42.5	≤ 3.5
	CPZ-CEM IV ET CLC-CEM V CHF-CEM III	42.5 52.5 52.5R Toutes les classes	≤ 4
Chlorures	Tous les types de ciment (**)	52.5R	≤ 0.05
		Toutes les classes	≤ 0.10

1.7 Les poussières de four à ciment :

1.7.1 Définition des poussières de four à ciment (PFC) :

Poussières de four à ciment [Cement Kiln Dust (CKD)] est un sous-produit de la fabrication du ciment. Poussières de four à ciment est une matière poudreuse fine ressemble à du ciment Portland. Il est composé de particules micron prélevés de précipitâtes électrostatiques durant la production de clinker. Ces déchets industriels frais peuvent être classés comme appartenant à l'une des quatre catégories, selon le procédé de four utilisé et le degré de séparation dans le système de dépoussiérage [74]

Il existe deux types de ciment four processus : Les rejets sont habituellement générés lors de la fabrication du ciment : les poussières de four de cimenterie et les rejets gazeux, les poussières se divisent en deux catégorie:

1. D'abord les émissions locales issues de l'exploitation des carrières, du transport, du stockage, et de l'expédition du ciment. En général, ces dernières n'affectent que l'environnement interne de l'usine.

2. La deuxième catégorie concerne les poussières émises par les gaz d'échappement des cheminées provenant du four et des broyeurs. En outre, la production des CKD peut entraîner une diminution voire éliminer les métaux toxiques tels que les métaux lourds du ciment. Cette réduction est assurée essentiellement par le cycle des volatils dans le four lors de la fabrication du ciment [75]

En outre, la production des CKD peut entraîner une diminution voire éliminer les métaux toxiques tels que les métaux lourds du ciment. Cette réduction est assurée essentiellement par le cycle des volatils dans le four lors de la fabrication du ciment.

En effet, l'alimentation du four en matières premières et en combustible, génère habituellement des composés mineurs volatils, essentiellement des composés de potassium, de sodium, de soufre, et de chlore [76] Ces produits à l'état vapeur dans les zones les plus chaudes du four se condensent dans les zones les plus froides [77] en fonction de la durée et des conditions de cuisson, ainsi que des espèces chimiques présentes.

Ce phénomène de cycle des volatils se développe seulement dans une partie bien délimitée du four. Les vapeurs en se condensant sur les particules de poussières vont soit, être entraînées par le flux gazeux en dehors du four (Cycle ouvert), soit ramenées vers les zones chaudes où elles se transforment en vapeur (Cycle fermé) (Figure I.03).

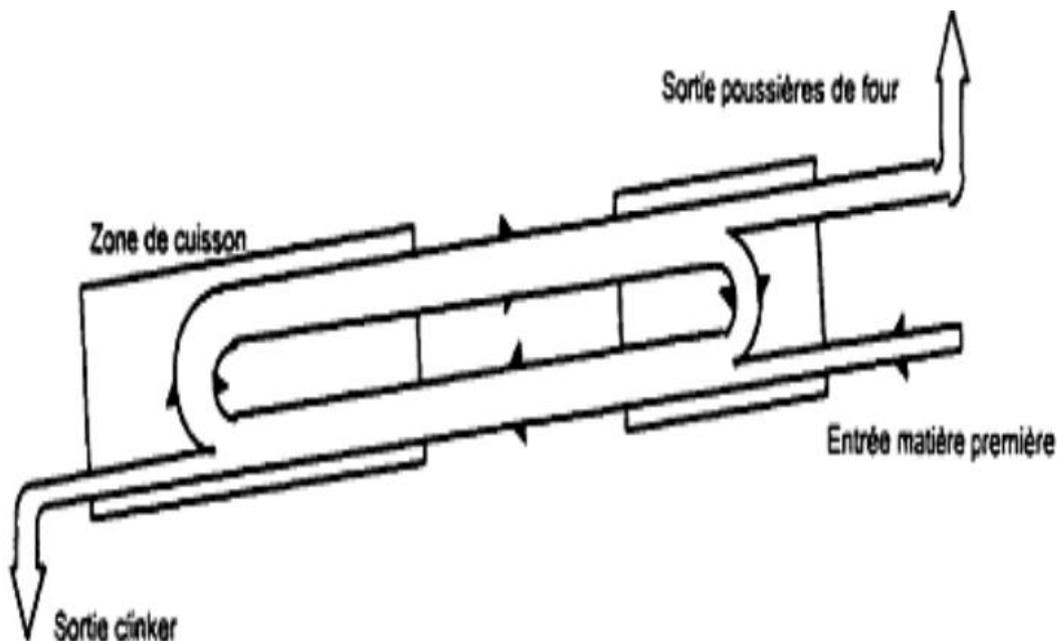


Figure 1 3 : Schéma du cycle des matières volatiles dans le four [76]

1.7.2 Composition chimique des CKD :

Les résultats obtenus par l'analyse chimique moyenne des CKD indiquent que La composition chimique du CKD est analogue à celle du ciment Portland conventionnel. [9]

Tableau1 2 : Analyse Chimique Des CKD Étudiées par le bureau[9]

Composé	Pourcentage en masse(%)
CaCO ₃	55.5
SiO ₂	13.6
CaO	8.1
K ₂ SO ₄	5.9
AL ₂ O ₃	4.5
Fe ₂ O ₃	2.1
KCL	4.1
MgO	1.3
KF	0,4
Autre	0,7
Totale	100

Des concentrations plus faibles (exprimées en partie par million) de métaux lourds et d'éléments en traces peuvent être aussi repérées ce qui confirme le caractère à risque pour l'environnement puisque les composés dissouts peuvent être des éléments polluants à cause de la présence dans leurs compositions chimiques de substances solubles.

Tableau1 3 : Teneurs moyennes des éléments en traces dans les CKD[10]

Eléments	Ag	As	Cd	Cr	Cu	Li	Mn	Ni	Pb	Sb	Zn
Teneurs (ppm)	4.8	9.3	7.3	34	24	16	280	148	29	1.6	167

1.7.3 Composition minéralogique des CKD :

Jusqu'à présent, toutes les études menées sur la poussière de four à ciment ont montré que la composition minéralogique est généralement la suivante:

- 94% des échantillons présentent la calcite comme constituant majeur;

- La chaux et l'anhydrite sont les phases minérales principales après la calcite ;
- L'existence de silice en faibles quantités dans presque tous les échantillons ;

En outre, d'autres phases telles que l'arcanite et l'alite sont susceptibles de se retrouver à côté de ces composés.

1.7.4 Variabilités chimique et minéralogique des CKD :

Le domaine de variation de la composition chimique des CKD est présenté dans le tableau 1.4

Dans la plupart des cas, la composition chimique de CKD est caractérisée par des niveaux élevés d'alcali (sodium et potassium), de chlorure et de sulfate. Cependant, selon les spécifications requises pour le produit final, cette composition variera d'une usine à l'autre, même au sein des cimenteries.

Tableau1 4: Intervalle de la variation minéralogique des CKD [10]

Eléments	Pourcentage		
	Faible	Moyen	Elevé
SiO ₂	6.0	16.5	28.5
Al ₂ O ₃	3.2	4.4	9.6
Fe ₂ O ₃	0.8	2.7	5.9
MgO	0.8	2.3	4.8
SO ₃	0.7	7.1	26.3
Na ₂ O	0.08	0.8	3.2
K ₂ O	1.08	5.5	26.2
Perte de feu	2.5	16.0	32.0

1.7.4.1 Classification des CKD :

En 1985, une classification des CKD a été établie par BHATTY :

- **Type S** : CKD pauvres en alcalis et en chlorures avec une teneur modérée en sulfates.
- **Type H** : contrairement au type S, ces poussières sont plus riches en sulfates ;

- **Type L** : ces derniers sont pauvres en sulfates.

Malgré cette brève classification des CKD, il est impossible de couvrir toutes les espèces par un traitement de routine, leur variabilité reste l'un des principaux problèmes nécessaires à la formulation des minéraux stabilisés. D'un autre côté, évaluer la faisabilité technique par des tests réels en laboratoire est la solution la plus fiable pour juger de l'efficacité du processus. [11]

Une analyse chimique étalée sur trois ans pour la poussière de la cimenterie

Alpena située au Michigan a révélé les points suivants (**figure I.5**).

- Un domaine de variation réduit pour la teneur en silice (12 à 15%) avec des écart-types de 0,2 à 1,0 ;
- La composition chimique en chaux varie entre 38 et 57 % avec des écart-types allant de 1,0 à 5,6 % ;
- Les aluminates et l'oxyde ferrique présentent, par contre, une certaine régularité avec des teneurs comprises, respectivement, entre 2,3 à 4,2 % et 1,3 à 1,8% ;
- Les sulfates présentent un domaine de variabilité considéré comme moyen.

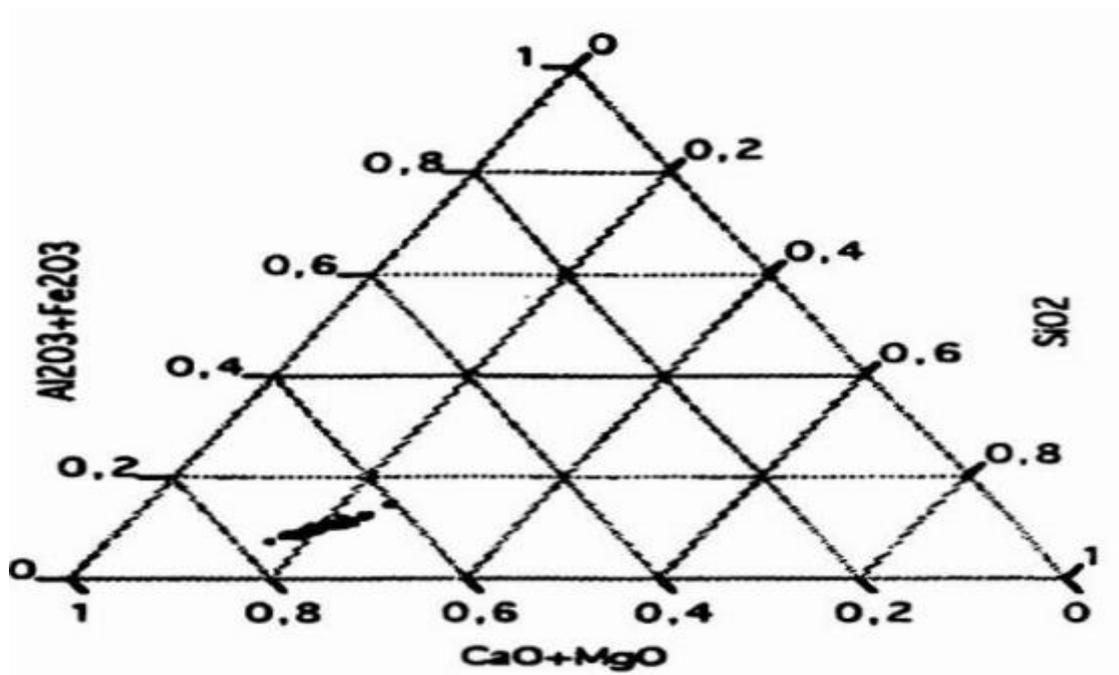


Figure1 4: Variabilité chimique des poussières Alpena dans le temps [12]

De plus, une analyse d'une cinquantaine de types de poussières provenant de différentes cimenteries a montré que la composition chimique évoluait de manière plus significative

- Ainsi, la silice présente des teneurs comprises entre 15 et 30 %
- Les aluminates associés à l'oxyde ferrique varient de 1 à 12 %.
- Les oxydes de calcium et de magnésium se caractérisent par une fourchette allant de 65 à 78 %.

Il semble qu'au fil du temps, les changements dans la composition chimique soient d'abord régulés par la teneur en chaux et sulfate. Cette variabilité est principalement due aux conditions prévalant dans les fours et à la variabilité inhérente des matières premières. En revanche, lors du transfert d'une usine à une autre, la plupart des éléments subiront des changements très importants dans certains cas. Cette particularité est liée aux propriétés minéralogiques de la carrière utilisée et au procédé de fabrication du ciment, et peut parfois être différente. Dans cette configuration, le sulfate et l'alcali sont les paramètres les plus affectés. [19]

1.1 L'utilisation des CKD :

L'utilisation des CKD ne se limite pas en tant que matière première pour le retour dans le four à ciment ou comme additif dans un ciment portland mélangés. CKD est également utilisé dans une variété d'autres applications telles qu'elles ou en combinaison avec d'autres additifs.

1.1.1 Stabilisation des CKDs avec ajout minéral :

La stabilité des poussières concerne essentiellement à maîtriser les réactions d'expansion résultant de l'hydratation combinée d'éléments tels que les sulfates, l'alumine, la chaux, la silice et les alcalins (Na, K), ces réactions d'expansion provoquent des augmentations du volume des mélanges accompagnés des fissurations polygonales intenses et d'une détérioration des propriétés mécaniques et hydrauliques du matériau. Elles sont dues à l'allongement par croissance cristalline de certains matériaux dites expansifs. La nature et la quantité de l'ajout minéral jouent un rôle important dans cette stabilisation. Une comparaison des ajouts choisis (cendre volante et fumé de silice) et une détermination de leurs dosages respectifs. [14]

1.1.2 Stabilisation des sols par ajout des CKDs :

Plusieurs études antérieures ont montré que la Poussière de four de ciment(CKD) ajoutée au sol en quantités modestes, a un effet bénéfique sur le comportement du sol et est une matière viable pour la stabilisation de certains types de sol et elle a le potentiel de réduire de façon significative l'indice de plasticité (IP) et d'augmenter la résistance du sol en un temps relativement court.

1.1.3 Stabilisation des CKD comme barrière hydrogéologique :

Cependant, malgré la multiplicité des domaines de réutilisation étudiés, une seule approche a été réalisée pour étudier la possibilité d'utilisation des CKD stabilisées comme barrière hydrogéologique dans les sites de stockage et d'enfouissement des déchets. En effet, la consolidation et la stabilisation des poussières de four de cimenterie par ajout de fumée de silice et les de cendres volantes s'est avérée très prometteuse surtout lorsque la composition pondérale du mélange adoptée est 80 : 20 : 5 respectivement. La bentonite, présente en faibles teneurs réduit de 30 % les propriétés mécaniques mais offre une meilleure ductilité. Cette dernière propriété a pour objectif d'assurer les déformations plastiques de la barrière sous l'effet de charge des engins mécaniques durant et après la mise en place. [15]

Cette étude a permis de mettre en évidence l'aspect compétitif entre le pouvoir pouzzolanique de l'ajout et l'amplitude de la réaction d'expansion de l'ettringite. Ainsi avec l'ajout de cendres volantes et ou de la fumée de silice, la réaction évolue vers le sens de la consommation de la chaux et le renforcement des résistances par la production des C-S-H.

Le lessivage de ces barrières concerne essentiellement les ions et les éléments chimiques libérés par les produits d'hydratation. Ce type de lixiviation, de courte durée, ne cause aucun endommagement à la structure grâce au développement important de l'ettringite et de la cimentation assurée par les C-S-H.

Enfin, la comparaison de ces barrières à celles conçues avec les argiles démontre l'avantage des poussières de four de cimenterie par leur caractère fortement alcalin. En effet, cette caractéristique est un paramètre important dans leur longévité mécanique et environnementale puisqu'elle permet une stabilité physico-chimique des phases essentielles à la structure et aussi une précipitation des métaux à l'intérieur de la masse.

Néanmoins, il faut noter que cette étude concerne des CKD provenant d'une seule cimenterie et ne tient pas compte de plusieurs contraintes citées ci-dessous :

- L'évolution dans le temps des produits d'hydratation;
- La génération de la chaleur lors de l'hydratation de ces matériaux ;
- L'influence de la composition chimique des CKD sur l'équilibre réactionnel entre le pouvoir pozzolanique des cendres volantes et les phénomènes d'expansion;
- L'influence du compactage sur les réactions d'hydratation;
- L'effet d'échelle et la mise en place des mélanges réels;
- L'étude de la migration des contaminants le long de la barrière et la stabilité de la forte alcalinité.

Concernant le concept d'accréditation d'une barrière environnementale à base de poussières de four, les buts principalement visés doivent répondre de façon satisfaisante aux critères requis et définis par les propriétés de durabilité, de ductilité et de perméabilité. [16]

En effet, la méthodologie adoptée dans cette contribution consiste, dans un premier lieu à faire des essais en laboratoire sur différentes combinaisons comportant des poussières avec ou sans cendres volantes et ciment. La deuxième partie a fait l'objet d'une extrapolation des mélanges ayant donnés les meilleures performances à une échelle réelle en mettant à profit des cellules de démonstration instrumentées dans le but de suivre les paramètres clés indispensables à l'évaluation de la longévité des barrières. [16]

La teneur en eau utilisée est du côté humide de l'optimum Proctor et un arrosage d'eau est nécessaire afin d'éviter toute dessiccation durant les périodes de chaleur affectant surtout la partie supérieure de la bannière. Ainsi, le compactage des couches supérieures doit être suffisant pour éviter tout soulèvement dû à une évaporation d'eau. La mise en place de la barrière doit se faire en couches de 25 à 30 cm et l'épaisseur de revêtement est limitée de façon sommaire entre 80 et 100cm. Dans cette étude, seules les CKD désignées Brookfield ont été consolidées par simple compactage sans ajout minéral.

Pour les autres CKD, la stabilisation a nécessité l'ajout des cendres volantes associées ou non à de faibles teneurs en ciment dans des cas particuliers puisque la consolidation s'est avérée impossible quel que soit le type de compactage mis en œuvre. En général, l'adjonction recommandée pour la plupart des poussières est évaluée à 10 % de cendres volantes.

1.1.4 Ajout des CKD dans le béton :

En Lybie notamment, les CKD posent un problème environnemental. Ils ont essayé de concevoir des bétons à faible résistance, en remplaçant partiellement le ciment Portland par des poussières. Ils ont montré qu'à 20% de CKD, la résistance à la compression diminue de 18% et, en conséquence, l'expansion des réactions alcali-granulat se situe dans les limites acceptables. [60] Le mélange optimum de cendres volantes, de CKD et d'agrégats proposés pour différentes applications se situe dans les limites suivantes (masse sèche) : 6 à 24% pour les cendres volantes, 60 à 90 % pour les CKD et 4 à 16 % pour les agrégats. Pour les CKD-cendre volantes –agrégats, si les sulfates sont supérieurs à 10% dans les CKD, la durabilité contre le gel-dégel sera très faible. [17]

CHAPITRE II

RECHERCHE

BIBLIOGRAPHIQUE (L'Argile)

2 CHAPITRE II : RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE (L'Argile)

2.1 Introduction :

Le but de ce chapitre est de présenter des notions de base sur la structure des minéraux argileux, comme elle détermine les propriétés physico-chimiques et aussi comment elle donne des particularités qui permettent de définir les familles et les espèces et encore la préparation de la pâte d'argile.

2.2 L'historique :

La Terre est la matière première naturelle que les humains utilisent pour construire depuis des milliers d'années.

À travers les âges mais aussi sur les continents, l'argile semble avoir une influence importante pour tout le monde, que ce soit à des fins médicinales ou pour d'autres réalisations quotidiennes telles que des constructions, des objets décoratifs, de la poterie ou des supports d'écriture. Ils ont clairement accompagné le développement des sociétés humaines. Il y a eu unanimité jusqu'à l'arrivée de l'industrie pharmaceutique entre le XIXe et le XXe siècle. La terre cuite, ces produits naturels fournis par Dame Nature qui se trouvent partout sur la planète. [18]

En raison de ses propriétés purifiantes, absorbantes et assainissant, l'argile est utilisée dans la momification des corps en Egypte ancienne, environ 7000 ans avant Jésus-Christ. La fameuse "boue du Nil" était une matière largement utilisée lors de cette pratique, la momification chilienne consistait à éviscérer le corps du défunt et à vider son crâne avant d'enduire ses os d'argile. Cette reconstitution de la morphologie initiale est l'une des premières empreintes des argiles dans l'Histoire. À cette époque, l'argile était également présente dans la Pharmacopée comme remède très naturel, qui pouvait soulager de nombreuses maladies telles que brûlures, maux d'estomac ... etc. [18]

Grâce à la facilité de pétrissage et de modelage, l'argile est un bon support pour la première construction. Les premiers témoignages sur la production de la brique sont remontés à l'époque des Babyloniens, ils les utilisaient crus, ils ne séchaient qu'au soleil, et depuis 2500 avant JC, l'homme a commencé à construire des briques en cuisson ayant des profils différents, par conséquent l'artisan a pu enrichir artistiquement la construction à travers des tendances différentes selon les périodes et les lieux. La brique en terre-cuite est un des rares produits qui ne se composent que de matériaux naturels: argiles, sable, eau et feu. Ces éléments,

opportunément façonnés, grâce à de nouvelles technologies pour le contrôle de la cuisson, engendrent un produit qui permet d'obtenir des bâtiments durables, esthétiquement agréables et économiquement rémunératrices. [19]

En début de XX^{ème} siècle, Bischof ou Le Chatelier sont le développée les mécanismes de la terre cuite pour obtenir la céramique moderne. [20]

2.3 Généralités :

2.3.1 Définition de l'argile :

Le mot argile provient du latin Argilla. Ce même mot est dérivé du grec argillos, dont la racine, argos, signifie " d'une blancheur éclatante ". Du XIIe au XVIe siècle, argile se disait "Ardille", puis ce mot est devenu "arzille", puis "arsille" pour finir en "argile" [21]

Le mot argile désigne deux notions dans le jargon géologique : une particule et un minéral.

Particule : C'est une particule dont la dimension est inférieure à 4 micromètres et ce, quelle que soit sa nature minéralogique.

Minéral : L'argile est un minéral (plus exactement une famille de minéraux) de la famille des silicates, plus précisément des phyllosilicates (silicates en feuillets). Leur structure est identifiable par étude aux rayons X ; elle se caractérise par la superposition de feuillets composés de couches tétraédriques ou octaédriques. Dans l'espace entre les feuillets, ou espace inter foliaire, se placent divers cations comme K, Na, Ca. L'argile est généralement issue de l'altération par l'eau des autres silicates (sauf le quartz). C'est pour cette raison qu'on le trouve systématiquement dans les sols et les formations superficielles. Minéral détritique ultrafin, on le trouve aussi très fréquemment dans les roches sédimentaires. Mélangé à un autre minéral comme la calcite il formera de la marne. Si l'argile est seule présente on désignera la roche sous le nom d'argilite. Souvent les deux notions présentées ici se rejoignent : le minéral argile est très souvent cristallisé très finement (cristaux ultramicroscopiques voire cryptocristallins) [22]

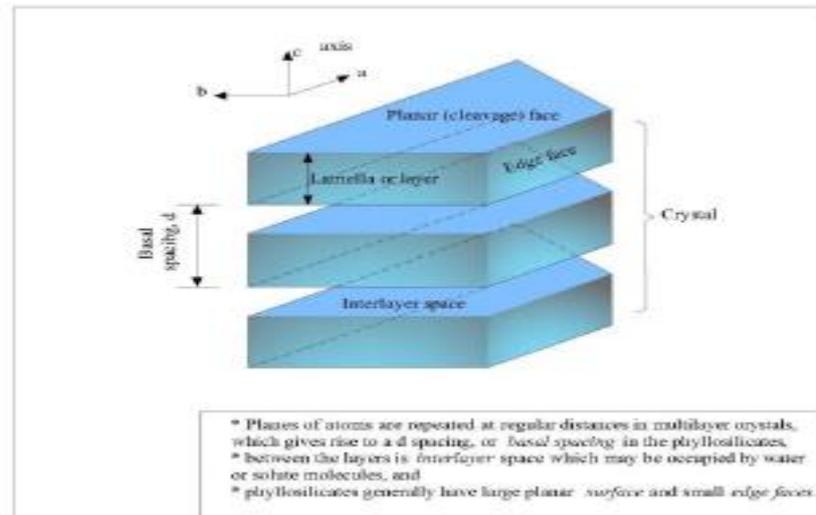
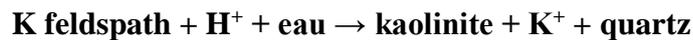


Figure2 1: structure d'une argile. [23]

2.3.2 Origine :

L'argile provient généralement des roches altérées. Il évolue constamment sur une échelle de temps géologique, passant d'un minéral argileux à un autre et changeant ses principales propriétés en fonction de l'environnement. En d'autres termes, le minéral argileux provient de la décomposition chimique des composants d'origine de la roche magmatique, en particulier le feldspath et le mica de granit, selon la réaction:



En fonction de la roche d'origine, des conditions et du temps de réaction, nous obtenons différents types d'argile qui se dégradent de plus en plus jusqu'au quartz final.

L'argile très abondante à la surface de la terre est aussi présente dans certaines météorites. [24]

2.3.3 L'argile et cycle géologique :

L'argile se forme là où l'eau réagit à l'état liquide avec des minéraux silicatés. Les minéraux argileux régénèrent les principaux éléments chimiques de la croûte terrestre, Ils sont témoins du développement de la croûte terrestre car elle dure longtemps après la disparition du fluide. Ils jouent également un rôle important dans la mobilité de la lithosphère et dans le recyclage de l'eau vers les profondeurs de la croûte terrestre. Sur le continent, la croûte volcanique crustale qui combine chaleur et eau d'origine magmatique et atmosphérique et substances minérales réactives comme le cendres de verre est très favorable à la formation d'argile par voie thermique aqueuse. Dans les conditions météorologiques. En condition atmosphérique, les argiles se forment par l'altération des silicates lessivés par les eaux de surface (altérites), ou par interaction

complexe entre silicates, eau et organismes vivant dans les sols. Dans les sols, les argiles facilitent la rétention du carbone ; elles régulent les transferts avec les plantes, elles agissent également sur le régime hydrique et sur la stabilité mécanique. [25]

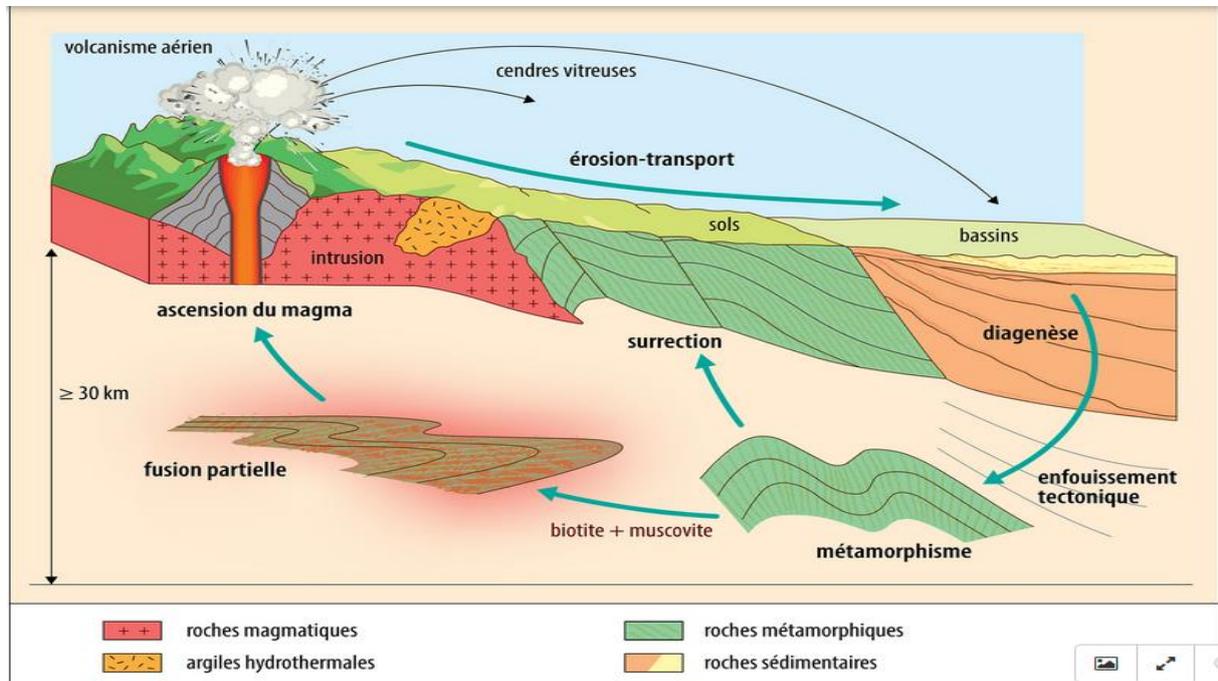


Figure2 2: Représentation schématique du cycle des argiles dans la croûte continentale (d'après R.J. Merriman, 2005)[25]

2.4 Minéraux argileux :

Un résumé de la structure générale des minéraux argileux et des caractéristiques majeures des principales familles de phyllosilicates est présenté de manière à donner le contexte nécessaire pour la compréhension des figures spectrales associées à ces minéraux. [26]

2.4.1 L'organisation structurale des phyllosilicates :

L'organisation structurale des phyllosilicates se base sur une charpente d'ions O^{2-} et OH^- . Ces anions occupent les sommets d'assemblages tétraédriques O^{2-} (figure II.3) et octaédriques ($O^{2-} + OH^-$) (figure II.4). Dans les cavités de ces unités structurales élémentaires viennent se loger des cations de taille variable (Si^{4+} , Al^{3+} , Fe^{3+} , Fe^{2+} , Mg^{2+}). Ces éléments s'organisent planairement pour constituer des couches octaédriques et tétraédriques dont l'épaisseur détermine l'épaisseur du feuillet. L'espace entre deux feuillets parallèles s'appelle espace interfoliaire. Lorsque deux cavités sur trois de la couche octaédrique sont occupées par Al^{3+} (ou un autre ion

métallique trivalent) la structure est dénommée dioctaédrique. Quand la totalité des cavités octaédriques est occupée par des ions métalliques bivalents, la structure s'appelle trioctaédrique. [23]

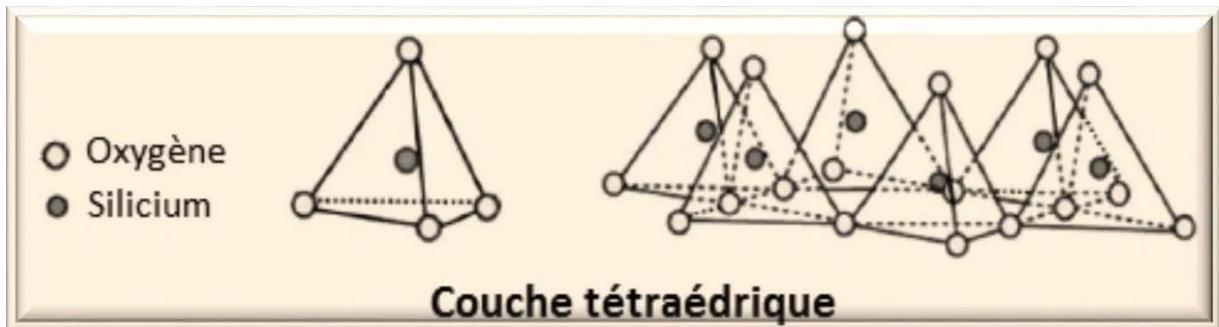


Figure2 3: Représentation de la couche tétraédrique (Morel, 1989).

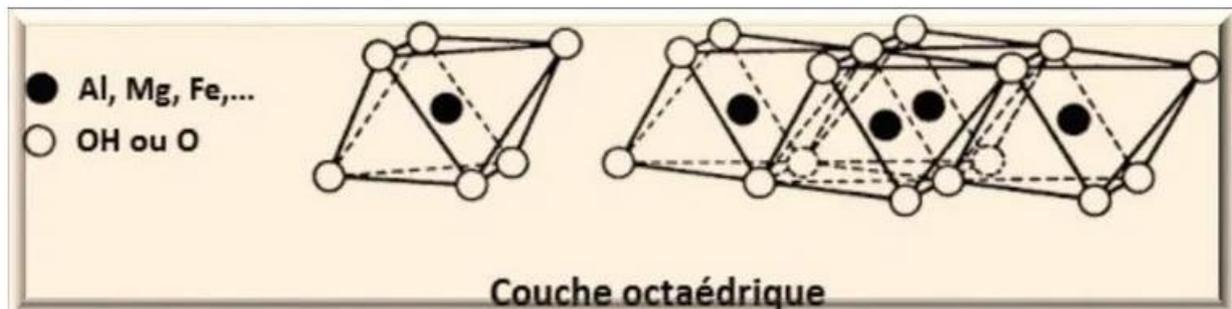


Figure2 4: Représentation de la couche octaédrique (Morel, 1989).

2.4.2 Types structuraux et classification des argiles :

La classification des phyllosilicates est basée sur un ensemble de critères qui combinent le nombre de couches collectées dans la feuille primaire, le mode d'empilement et la chimie des feuilles. Presque tous les minéraux argileux peuvent être regroupés en trois grandes familles structurales (Figure2.5) :

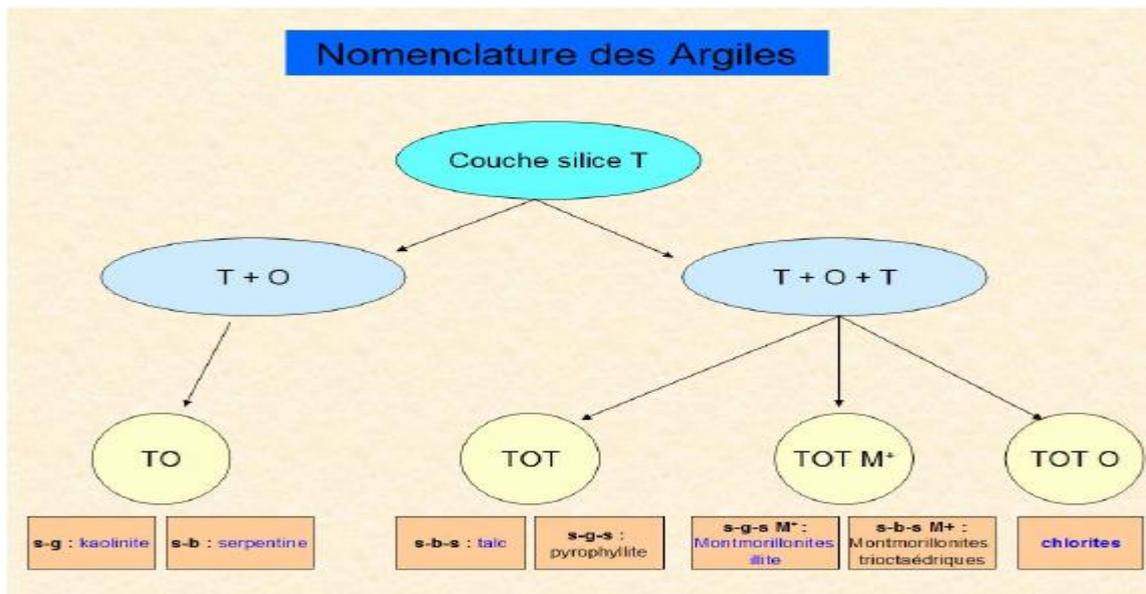


Figure2 5: Caractéristiques des différentes familles d'argile [28]

L'association de ces deux motifs de couches conduit à trois principaux types de minéraux (tableau 2.1):

- Minéraux de type 1/1 ou T-O à une couche tétraédrique et une couche octaédrique.

L'équidistance caractéristique est voisine de 7 Å. A ce type correspond le groupe de la kaolinite ;

- Minéraux de type 2/1 ou T-O-T à une couche octaédrique encadrée par deux couches

Tétraédriques. L'équidistance caractéristique varie de 9.4 à 15 Å selon le contenu de l'inter feuillet (tableau 2.1) ;

- Minéraux de type 2/1/1 ou T-O-T-O à une couche d'octaèdres encadrée par deux

Couches tétraédriques, et un inter feuillet constitué par un feuillet brucitique. L'équidistance caractéristique est alors d'environ 14 Å. A ce type correspond le groupe des chlorites (tableau 2.1).

- Il existe bien entendu des minéraux interstratifiés, formés d'un empilement régulier où irrégulier de feuillets de deux types différents. Lorsque l'un des feuillets est de type smectites, le comportement peut s'avérer gonflant. C'est le cas de la kaolinite-montmorillonite, la saponite-chlorite, la montmorillonite-mica, l'illite-montmorillonite. [29] (figure 2.6).

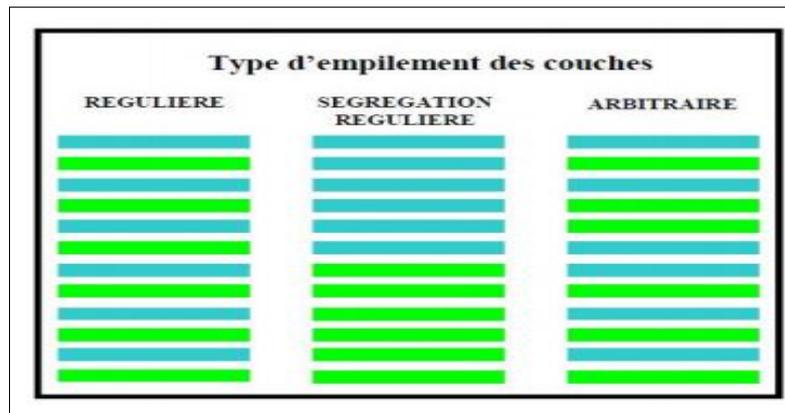


Figure2 6: Structure des minéraux inter stratifiés

Tableau2 1: Principaux types des minéraux argileux.[30]

Type	Caractéristiques principales	Exemples types	CEC (meq/100g)	Surface spécifique (m ² /g)
1/1 (T-O)	- Une couche d'octaèdres ; - une couche de tétraèdres ; - 7,1Å d'équidistance.	Kaolinite Serpentine	1-15	10-20
2 /1 (T-O-T)	-Deux couches de tétraèdres ; - une couche d'octaèdres ; - 9,4 à 15 Å d'équidistance.	Illite Vermiculite Smectite	10-40 130-210 70-150	50-100 10-800 10-800
2/1/1 (T-O-T-O)	- Une couche d'octaèdres ; - deux couches de tétraèdres ; - un interfeuille d'octaèdres ; - 14 Å d'équidistance.	Chlorite Palygorskite Sépiolite	10-40 5-30 10-45	10-20 150-900 150-900

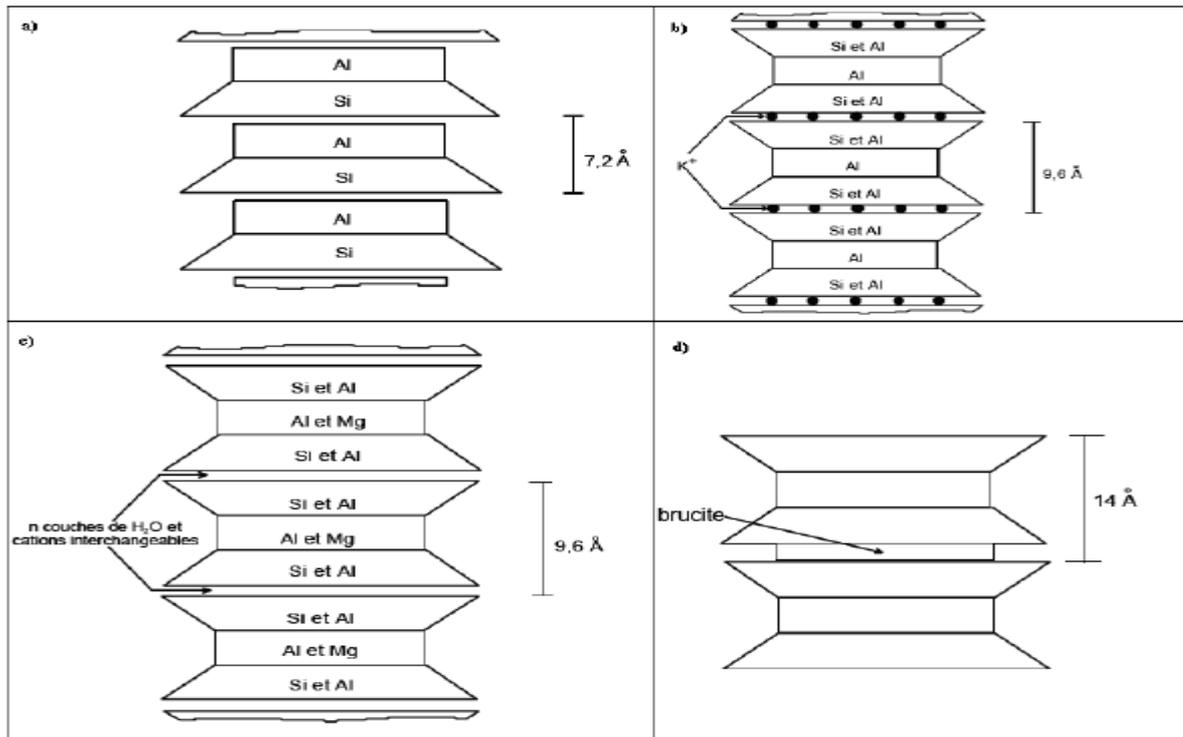


Figure2 7: Schéma de la particule de a) kaolinite, b) illite, c) smectite et d) chlorite

2.4.2.1 La kaolinite :

Les minéraux de cette famille se forment communément par condensation et proposent en accord avec la représentation de la figure, une structure a deux couches. La stabilité des feuillets de kaolinite se voit assurée par des groupements hydroxyles de la couche octaédrique s'insérant en lieu et place d'atomes oxygène de la couche tétraédrique. L'unité structurale apparait électriquement neutre et dispense les kaolinites de toute adsorption de cations. Cette particularité leur confère ainsi la formule chimique $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$. [31]

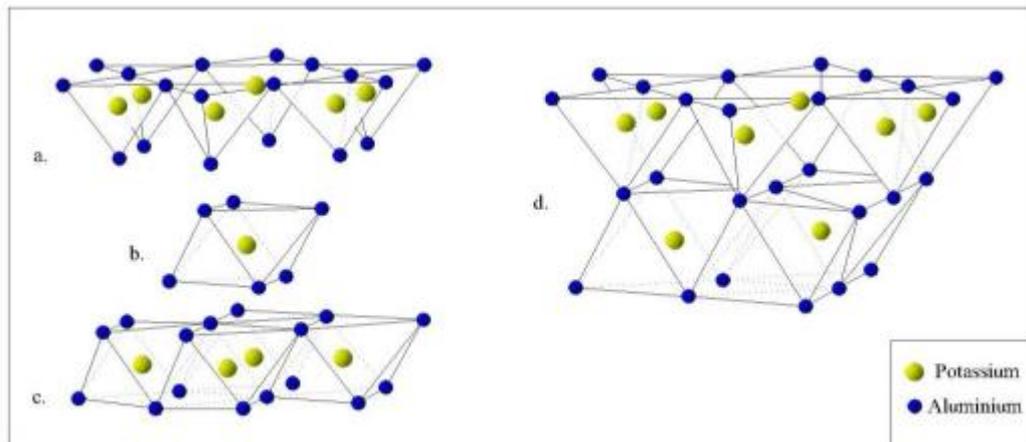


Figure 28: Modèle structural de kaolinite, a- feuillet tétraédrique, b- octaèdre les atomes coordonnés peuvent être Al, Fe ou Mg, c- feuillet octaédrique, d- modèle schématique de la couche de kaolinite (Celso and al., 1998). [23]

2.4.2.2 L'illite :

Les minéraux argileux de ce groupe présentent une structure à trois couches avec un agencement cristallin très proche des micas. La couche octaédrique des illites est encadrée par deux couches tétraédriques ou des atomes d'aluminium substituent certains atomes de silicium, à une fréquence d'un sur six. Le déficit en charges au sein même des couches bouleverse l'équilibre électronique du feuillet qui ne se voit compensé que par une apparition en ions potassium au travers du réseau cristallin. [31]

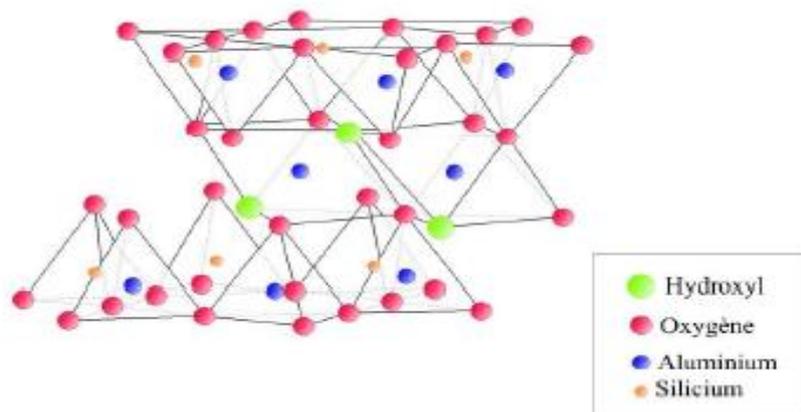


Figure 29: La structure de l'illite montre des feuillets composés d'une couche octaédrique liée à deux couches tétraédriques. [23]

2.4.2.3 Les smectites :

Les minéraux de ce groupe argileux se composent à la manière des illites avec une couche octaédrique centrale encadrée de couches tétraédriques. Les substitutions atomiques s'étendent toutefois pour les smectites la couche octaédrique avec une apparition récurrente en fer ou en magnésium. [24]

2.4.2.4 Les chlorites :

Se forment par une décomposition de mica. Ces minéraux affichent, à la manière des illites, une structure à trois couches avec une majorité toutefois d'atomes de magnésium ou de fer issus des substitutions au sein de la couche octaédrique. Les feuillets de chlorite en retournent ainsi, de manière atypique, une charge positive. L'équilibre électronique se voit en fin de compte assuré par le biais d'un comblement de l'espace interfoliaire avec un composé minéral riche en magnésium pouvant s'établir sous une formule chimique de la forme $Mg(OH)_2$. [32]

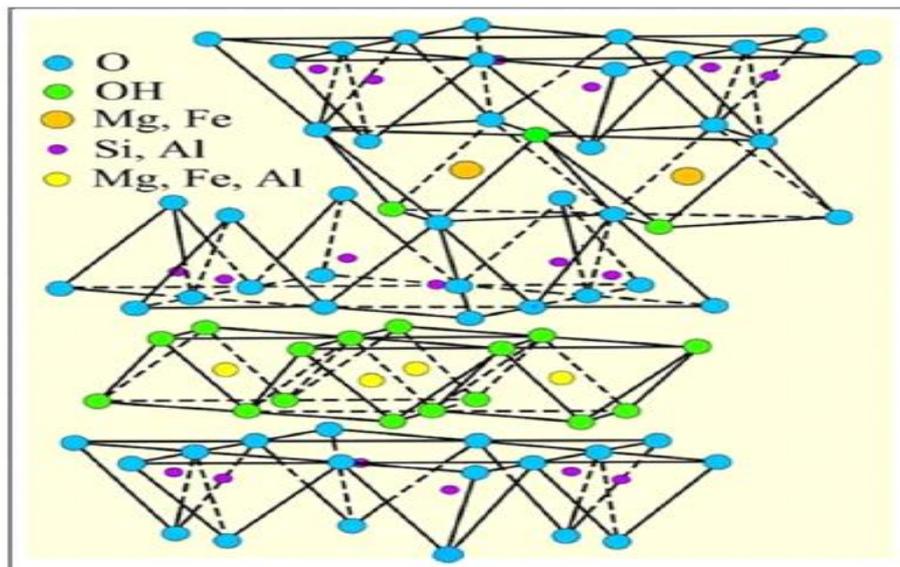


Figure2 10: La structure du chlorite se caractérise par la présence d'une couche octaédrique interfoliaire.

2.5 Propriétés physico-chimiques des argiles :

Les propriétés sont définies par la constitution chimique, l'épaisseur et l'écartement des feuillets de l'argile.

2.5.1 Plasticité :

Cette propriété traduit la malléabilité bien connue des matériaux argileux. Ce qui veut dire que l'argile est capable de se déformer à l'échelle macroscopique sous l'action d'une force externe.

2.5.2 Forme et surface spécifique :

Par définition, la surface spécifique (S_s) appelée aussi « Aire massique » représente la surface totale (A_s) par unité de masse (M) et on l'exprime généralement en m^2/g :

$$S_s = \frac{A_s}{M} (m^2/g)$$

La fine taille des minéraux argileux leur confère une surface importante par rapport au volume des particules. [33] (**Tableau 2.2**).

Tableau2 2: Surface spécifique des particules argileuses [34]

Argile	Surface spécifique		
	Interne	Externe	Total
Smectite	750	50	800
Vermiculite	750	<1	750
Chlorite	0	15	15
Kaolinite	0	15	15
Illite	5	25	30

La surface des minéraux argileux est supérieure à celles de minéraux de même taille mais de forme différente. La (**figure 2.11**) montre également que la surface spécifique (S_s) dépend de la forme de la particule. On peut remarquer que celle-ci a tendance à s'aplatir quand la surface spécifique (S_s) augmente.

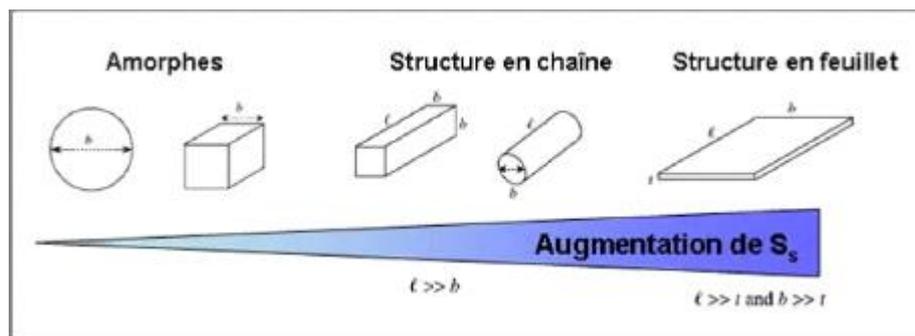


Figure2 11: Influence de la forme de la particule sur la surface spécifique.[35]

Les propriétés des argiles sont principalement contrôlées par leur surface interne et externe.

2.5.3 Degré d'hydratation :

Les processus d'absorption d'eau dans la structure des argiles sont complexes et peuvent être décrits de l'état sec vers l'état hydraté ou de l'état hydraté vers l'état sec. Mais ces deux séquences ne décrivent pas le même phénomène et il résulte que les mécanismes sont différents lorsque l'on étudie l'hydratation ou la déshydratation. Les minéraux argileux sont généralement caractérisés, à des degrés différents suivant la nature de la famille, par leur capacité d'adsorption d'eau. Cette eau existe sous multiples formes: adsorbée sur les surfaces externes ou associée

aux cations interfoliaires ou cristalline sous forme d'hydroxyle (OH) dont l'élimination se fait par d'hydroxylation [36]

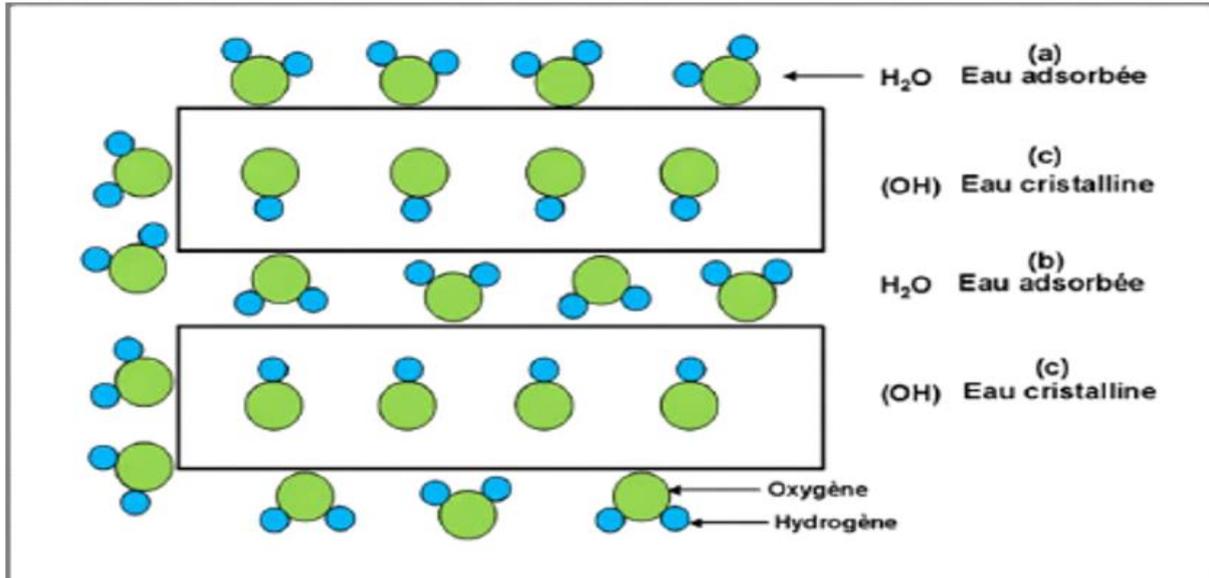


Figure 2 12: Localisation de l'eau dans les particules argileuses (a) Molécules d'eau adsorbées sur la surface d'argile ; (b) Molécules d'eau associées avec les cations dans l'espace interfoliaire ; (c) Eau cristalline sous forme d'hydroxyle qui par des hydroxylation

2.5.4 Description de la séquence de gonflement :

Les processus d'absorption d'eau dans la structure argileuse sont complexes et peuvent être décrits de l'état sec à l'état de l'eau ou de l'état de l'eau à l'état sec. Mais ces deux chaînes ne décrivent pas le même phénomène, et il s'ensuit que les mécanismes sont différents lors de l'étude de l'humidité ou de la déshydratation. L'étude de l'absorption de chaleur par absorption met en évidence la présence de décélération, ce qui indique que les mécanismes d'hydratation et de déshydratation ne sont pas complètement réversibles. [37]

Dans la littérature, il existe une désignation très spécifique pour ces deux modes de gonflement qui se caractérisent par leur capacité à hydrater. Il s'agit des gonflements "cristallin" et "osmotique" :

2.5.5 Capacité d'échange cationique :

A substitution isomorphe dans les couches octaédriques par des cations de valences inférieure à celle des cations Al^{3+} , crée un déficit de charge positive et confère au feuillet une charge globale négative. La neutralisation de cette charge est assurée par des actions échangeables (de compensation), localisés dans l'espace interfoliaire, il s'agit généralement des cations Na^+ , K^+ , Ca^{2+} et Ba^{2+} . Si maintenant des substitutions isomorphiques de Si^{4+} par Al^{3+}

ont lieu au niveau de la couche tétraédrique, l'excès de charge négative est localisé beaucoup plus près des oxygènes de la surface, permettant la formation de complexes cette fois très forts avec des cations ou des molécules d'eau. [34]

2.6 Forces existantes entre les particules argileuses :

Les forces de collage entre plaques sont nombreuses et de nature très complexe. Diverses alternatives aux actions peuvent se produire et interviennent avec certaines caractéristiques, qui sont les capacités d'échange de cations et les forces de liaison. Les forces d'attraction, de répulsion et de friction inter- particulaires en milieu aqueux sont les composantes de base de comportement mécanique, macroscopique des suspensions colloïdales. Cette théorie permet de rendre compte de la stabilité des systèmes eau-argile. [35]

2.7 Applications des matières argileuses :

Les argiles sont des minéraux naturels utilisés par l'homme depuis des millénaires du fait de leurs abondances et de leurs propriétés remarquables qui les destinent à de multiples applications : matériaux de construction, produits céramiques, moules pour la métallurgie, extraction pétrolière, agriculture, santé, cosmétique, poterie, textile, matière plastique

CHAPITRE III

PROTOCOLES EXPERIMENTAUX

3 CHAPITRE III : PROTOCOLES EXPERIMENTAUX

3.1 Introduction :

Dans ce chapitre nous avons présenté la caractérisation des matériaux qu'il faut étudiés puis nous avons montré les techniques et modes opératoires des essais.

3.2 Limite d'Atterberg :

Les limites de consistance sont exprimées en teneur en eau marquant la limite entre l'état solide, l'état plastique et l'état liquide (figure3.1). Ce concept, développé par Albert Atterberg, ne s'applique qu'à la partie fine des sols. [38]

3.2.1 Principe :

Cette essai contient les définitions des limites de consistance : [39]

- La limite de liquidité W_L : est celle pour laquelle le sol passe de l'état liquide à l'état plastique ;
- La limite de plasticité W_P : est celle pour laquelle le sol passe de l'état plastique à l'état solide avec retrait ;
- La limite de retrait W_S : est celle pour laquelle le sol passe de l'état solide avec retrait à l'état solide sans retrait.

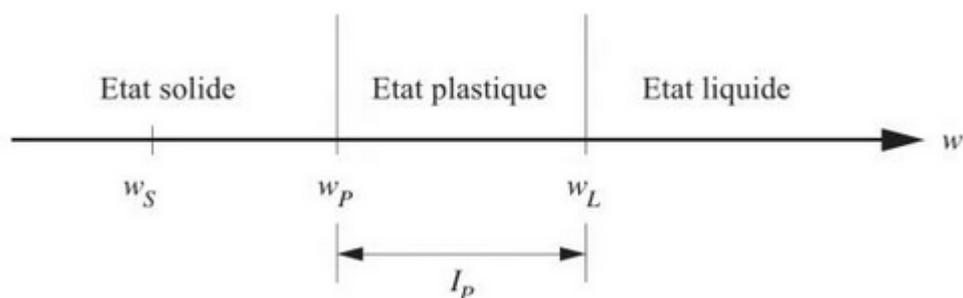


Figure3 1: Limite de consistance. [38]

On définit encore l'indice de plasticité I_p comme la différence entre la limite de liquidité et celle de plasticité $I_p = W_L - W_P$ [39]

Et l'indice de consistance I_c : $I_c = \frac{W_L - W}{I_p}$[39]

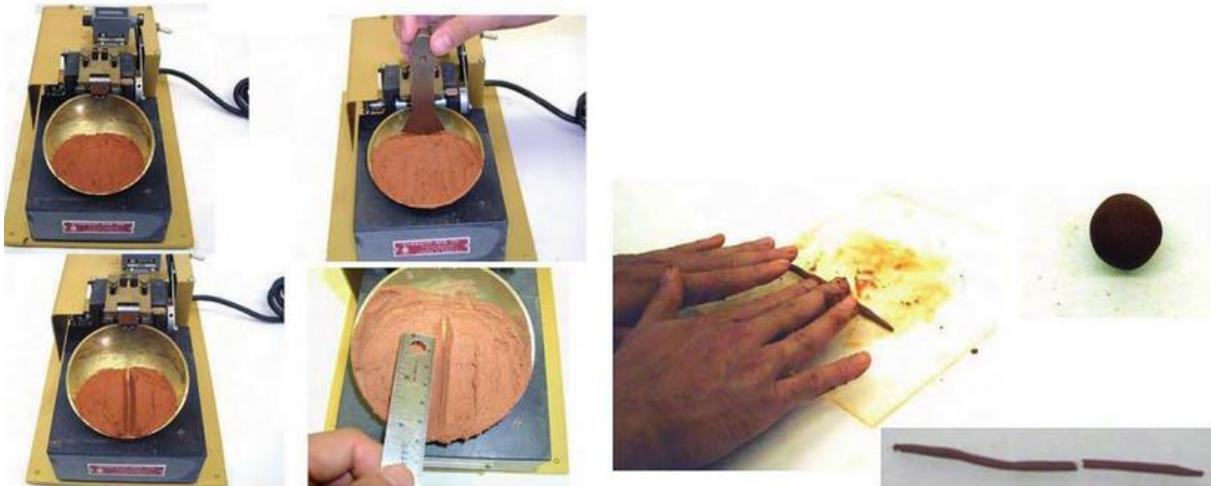


Figure3 2: Déterminations des limites de plasticité et liquidité. [38]

Pour l'activité des Argiles :

L'activité A est définie comme le rapport de l'indice de plasticité à la teneur en argile et permet un classement qualitatif des argiles [39], comme indiqué dans le (Tableau3.1).

Tableau3 1: compacité des sols granulaires en fonction de leur indice de densité. [38]

Indice de densité I_D	Compacité
$I_D < 0.2$	Très lâche
$0.2 < I_D < 0.4$	Lâche
$0.4 < I_D < 0.6$	Moyennement dense
$0.6 < I_D < 0.8$	Dense
$0.8 < I_D < 1$	Très dense

Des valeurs de A sont également présentées [46]au (Tableau3.2).

$$A = \frac{I_p}{\%(\phi < 2\mu\text{m})}$$

Tableau3 2: Classification des argiles selon leur activité [38]

Activité A	Classification
< 0.75	Argile inactive
0.75 - 1.25	Argile normal
> 1.25	Argile active

3.2.2 Matériel utilisé :

- Appareil de casa grande : cette appareil composé d'une coupelle métallique en forme de calotte sphérique dans laquelle est placé l'échantillon de sol préparé pour la détermination des limites d'Atterberg [40], avec Accessoires un outil de Casagrande à rainurer avec cale, outil pour sol peu plastique (Figure 3.3). Des récipients, Une balance électronique, truelle et un compteur des coups.

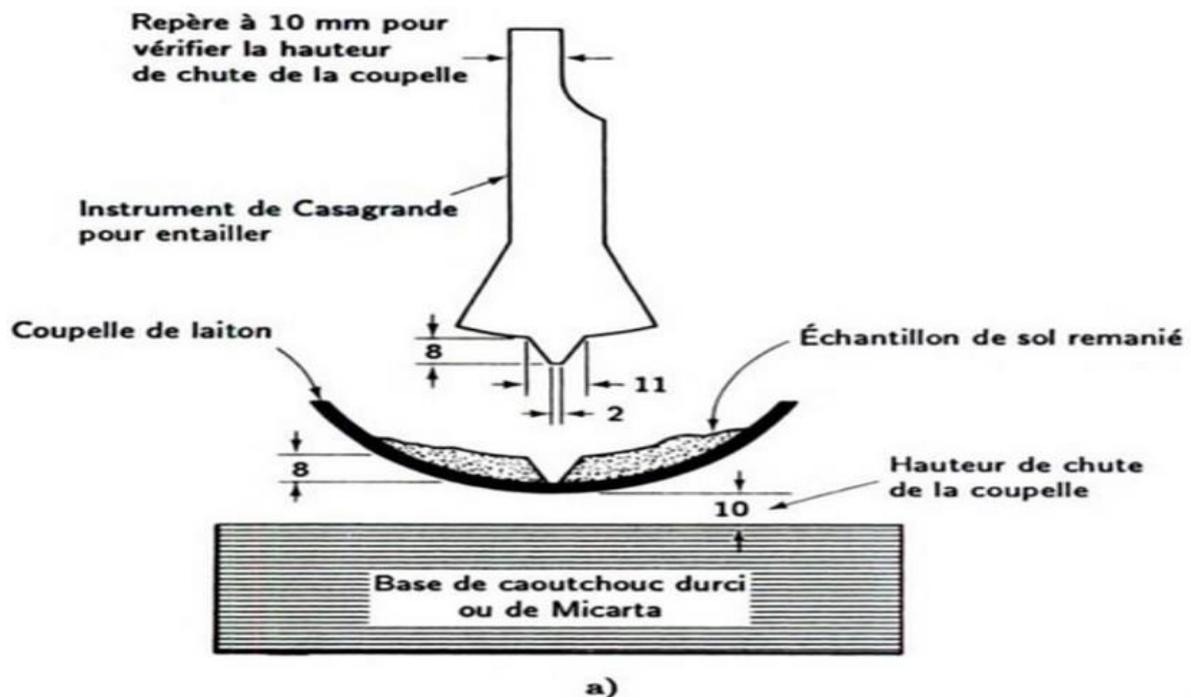


Figure3 3: Diagramme représentant l'appareil de limite de liquidité de Casagrande et l'instrument pour entailler : les mesures sont indiquées en millimètres. [39]

3.2.3 Mode opératoire de l'essai :

D'abord il faut peser plusieurs récipients dans lesquels des petits échantillons seront placés ultérieurement pour en déterminer la teneur en eau, après on va tamiser le matériau

préalablement afin que l'essai soit effectué uniquement sur la fraction inférieure à $400\mu\text{m}$, enfin on va ajouter progressivement une quantité d'eau au sol et malaxer vigoureusement, cette fraction est traitée soigneusement pour obtenir une pâte homogène. [41]

A. Déterminer la limite de liquidité W_L :

- Pour déterminer la limite de liquidité, on étale environ 200gramme de sol dans la coupelle de l'appareil de Casagrande.
- Une fois que la coupelle est monté sur l'appareil, une rainure de 2 mm de largeur est tracée dans le matériau au milieu de la coupelle à l'aide d'un outil rainuré.
- On applique à la coupelle des séries des chocs réguliers, à raison de 2 chocs par seconde. Noter le nombre de chocs qui correspond à la fermeture de la rainure.
- Recommencer l'opération 4 à 5 fois avec des teneurs en eau décroissantes et telles que le nombre de chocs à chaque essai soit compris entre 15 et 35 :
- Si le nombre de choc est inférieur à 15, laisser sécher un peu.
- Si le nombre de chocs est supérieur à 35, humidifier légèrement et bien homogénéiser l'argile et reprendre l'essai.

Par définition la limite de liquidité d'un matériau est la teneur en eau à laquelle la rainure se refermé sur 1 cm après 25 coups.

- On utilisent l'extrémité non biseautée de l'outil à rainurer, on prélève un échantillon dans la zone ou le matériau se refermé de 1 cm, afin de déterminer la teneur en eau.

On réalise une régression linéaire avec 4 ou 5 points de mesure de la teneur en eau différents pour obtenir la teneur en eau rechercher. [38]

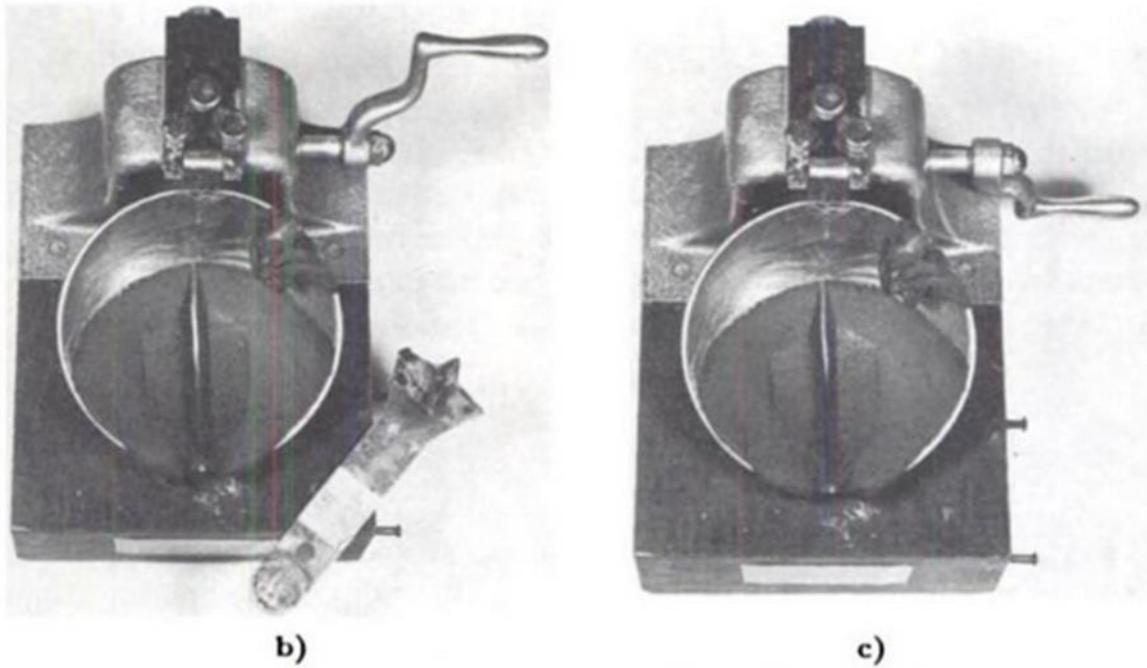


Figure3 4: b) Ouverture de l'entaille au début de l'expérience ; c) Ouverture après un nombre de chutes suffisant pour refermer l'entaille sur 13 mm (D'après Hansbo, 1975).

B. Déterminer la limite de plasticité W_P :

- Pour déterminer la limite de plasticité, on forme des rouleaux de sol jusqu'à un diamètre de 3 mm.
- Lorsque le rouleau se brise ou se morcelé quand il atteint un diamètre de 3 mm en détermine sa teneur en eau.

Etant donné que cette essai est très sensible, il est répété plusieurs fois, et la teneur en eau est déterminé à plusieurs reprises pour obtenir une valeur moyenne.

- Tous les récipients peser sont placés dans une étuve afin de les sécher jusqu'à une masse constante à une température de 110 °C. ils sont ensuite peser à nouveaux. [41]

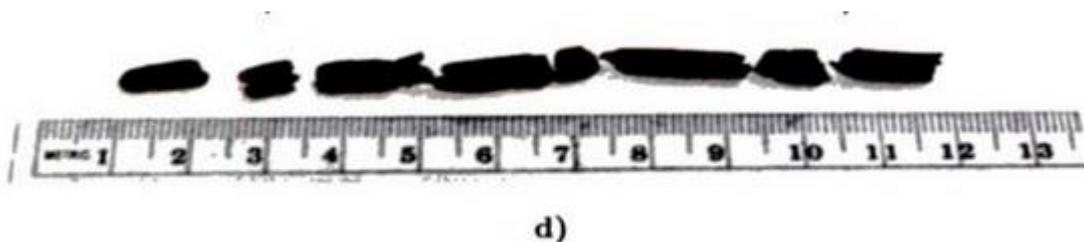


Figure3 5: Rouleaux à la limite de plasticité. (Photographies de M.Surenda).[39]

3.3 LES CARACTERISTIQUES MECANIQUE :

Le matériau ne répond pas de la même manière aux différentes charges auxquelles il est soumis; il peut bien résister à la flexion et résister moins bien à la torsion et pas du tout à la traction. L'expérimentation permet la connaissance de la résistance limite qu'entraîne la rupture du matériau. Cette résistance est souvent le rapport entre la force de rupture et la section ayant subie cette force [42]

Dans ce chapitre on va étudier les résistances à la compression, à le retrait et à la traction par flexion des éprouvettes de d'argile.

3.3.1 Préparation des éprouvettes :

3.3.1.1 Mode opératoire :

Préparation des échantillons pour les essais mécaniques selon le pourcentage d'addition des CKD, il faut confectionner une série témoin ne contenant pas d'ajouts (0% des CKD). Les résultats expérimentaux de cette série soient comparés avec ceux des séries (2,3,4 et 5) comportant des pourcentages d'ajouts des CKD (2,5%, 5%, 10% et 15%) respectivement :

Introduire l'eau et l'argile dans le bol, en prenant soin d'éviter toute perte d'eau ou d'argile, dès que l'eau et l'argile entre en contact, on mette immédiatement le malaxeur en marche à petite vitesse tout en lançant le chronométrage des étapes du malaxage. De plus, enregistrer le temps de démarrage à la minute près, comme étant le 'temps zéro'. Après 30 s de malaxage, introduire régulièrement les poussières de four à ciment pendant les 30 s suivantes. On passe le malaxeur sur grande vitesse et continuer le malaxage pendant 30 s supplémentaires. Le 'temps zéro' est le point de départ pour calculer les temps de démoulage des éprouvettes et pour déterminer la résistance. Arrêter le malaxeur pendant 90 s, dans les premières 30 s, enlever au moyen d'une raclette en caoutchouc ou en plastique tout le mortier adhérent aux parois et au fond du bol et le placer au milieu du bol. Reprendre le malaxage à grande vitesse pendant 60 s. [43]

3.3.1.2 Confection des éprouvettes :

a) Dimension des éprouvettes :

Les éprouvettes doivent être de forme prismatique et mesurer $(4 \times 4 \times 16)$ cm³ ont été préparées à la main dans le laboratoire de béton de l'université de Bejaia. [44]



Figure3 6: Le moule 4*4*16 (laboratoire génie mécanique université Bejaia). [44]

b) Moulage des éprouvettes :

- Mouler les éprouvettes immédiatement après la préparation de la pâte.
- Introduire, à l'aide d'une cuillère appropriée en une ou plusieurs fois, la première des deux couches de mortier (chacune d'environ 300 g) dans chacun des compartiments du moule, directement à partir du bol de malaxage.
- Étaler les couches uniformément à l'aide de la grande spatule. Ensuite, serrer les couches de mortier par 60 chocs de l'appareil à chocs pour chaque couche.
- Retirer doucement le moule de la table à chocs et ôter la hausse. Enlever immédiatement l'excès de mortier à l'aide de la règle métallique.
- Refaire l'opération d'arasement en tenant la règle selon un angle plus aigu pour lisser la surface. [43]



Figure3 7: Briques crues laboratoire génie civil université Bejaia). [44]

III.3.1.4 : Age des éprouvettes pour les essais de résistance mécanique :

Calculer l'âge des éprouvettes à partir du « temps zéro ». Effectuer les essais de résistance aux différents âges indiqués, avec les tolérances suivantes: [43]

24 h \pm 15 min.

48 h \pm 30 min.

72 h \pm 45 min.

7 jours \pm 2 h.

\geq 28 jours \pm 8 h

3.3.2 Essai de rupture par flexion :

L'essai de flexion est un essai mécanique utilisé pour tester la résistance en flexion. Appelée aussi l'essai de flexion 3 points qui permet également de mesurer la résistance à la rupture d'un matériau [45]. Cet essai est réalisé sur l'appareil de flexion en plaçant l'éprouvette symétriquement entre deux mâchoires. Ces dernières servent d'appuis et une troisième est destinée à appliquer un moment fléchissant. Après rupture de l'éprouvette la valeur de la force de flexion est directement lue en KN. Effectivement, les contraintes de traction dans cette section sont données par la formule classique suivante :

$$\sigma = \frac{M}{I/V}$$

-I : moment d'inertie de la section.

-V : distance du point considéré à l'axe

. Le but de l'essai est la détermination de la résistance à la flexion sous l'action des forces appliquées perpendiculaire au plan de l'éprouvette. La rupture de chaque éprouvette en flexion est effectuée en augmentant progressivement la charge appliquée.



Figure3 8: Appareil de la résistance à la flexion (laboratoire génie civil université Tizi Ouzou). [44]

3.3.3 L'essai de compression :

L'essai de compression consiste à soumettre les demi-échantillons obtenus après la rupture à la flexion, placés entre les plateaux d'une presse, à deux forces axiales opposées, l'un de ces plateaux est fixe l'autre est mobile, à vitesse constante le plateau mobile vient comprimer l'échantillon, l'effort et la contrainte augmentent jusqu'à la rupture ; l'ordinateur enregistre la valeur on a la résistance à la compression de l'échantillon. [46]

Nous appliquons une charge de compression F progressivement sur une section de $S=40 \times 40$ mm jusqu'à la rupture tout en prenant soin de noter la valeur mesurée pour calculer la résistance à la compression à partir de la formule :

$$R_c = \frac{P}{S}$$

Où :

R_c : Résistance à la compression.

P : charge de rupture.

S : section de l'éprouvette.

Pour cet essai, plusieurs conditions doivent être remplies :

- Les faces de l'éprouvette qui sont en contact de la presse doivent être bien planes et perpendiculaires à l'axe de l'éprouvette.
- La ligne d'application de la force doit coïncider avec l'axe de l'éprouvette.
- La vitesse de la force d'application doit croître régulièrement, ni trop vite ni trop lentement afin d'éliminer les effets de chocs et de fluage. [47]



Figure3 9: Appareil de la résistance à la compression (laboratoire génie civil université Tizi Ouzou). [44]

3.3.4 Essai de retrait:

Le suivi de l'évolution du retrait de sol argileux en continu nous a semblé nécessaire, afin d'identifier les éventuels effets de la texture du sol sur le retrait.

Tableau3 3: Barème du critère géotechnique suivant le retrait. [50]

Retrait linéaire	Susceptibilité	Note
$RI < 0.4$	Faible	1
$0.4 \leq RI < 0.65$	moyenne	2
$0.65 \leq RI < 0.75$	Forte	3
$RI \geq 0.75$	Très forte	4

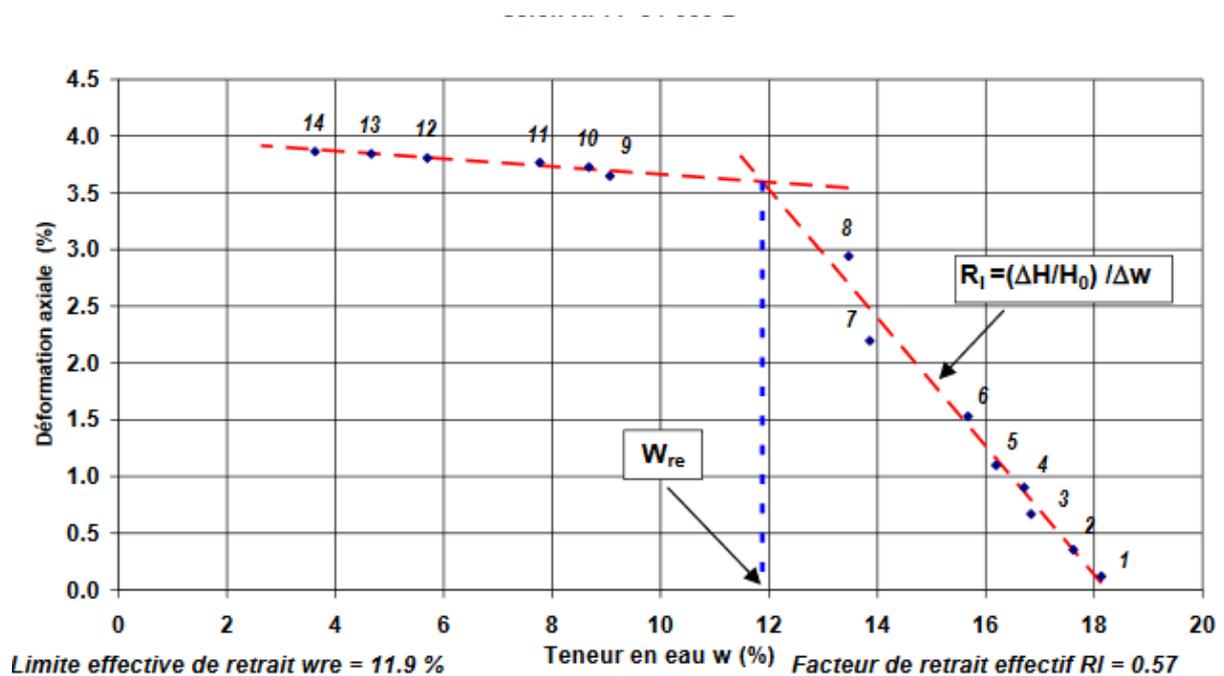


Figure3 10: Détermination effective de la limite de retrait sur un échantillon non remanié selon XP. P 94-060-2 [51]

3.3.4.1 Matériel utiliser :

- Etuve
- Dessiccateur de verre
- Balance électronique
- Appareil dans la norme française XP P 94-060-2

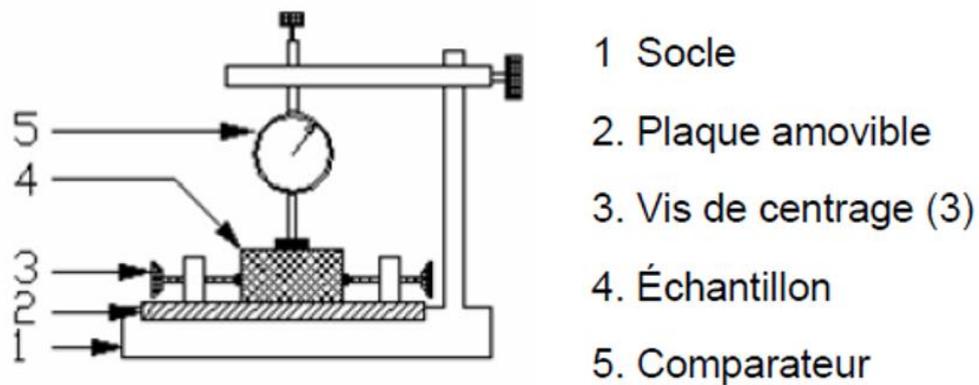


Figure3 11: Dispositif pour l'essai de retrait (XP P 94-060-2) [48]

3.3.4.2 Mode opératoire :

L'essai de dessiccation consiste à laisser se dessécher librement et progressivement une éprouvette cylindrique de sol et de mesurer périodiquement sa variation de hauteur et sa masse. Le résultat de l'essai permet de déterminer l'amplitude d'affaissement d'un sol correspondant au passage d'un état de teneur en eau $w_1(z)$ à un état de teneur en eau $w_2(z)$, avec $w_2 < w_1$, quel que soit z .

-diamètre de l'éprouvette: $35 \text{ mm} \leq D_0 \leq 50 \text{ mm}$

-hauteur de l'éprouvette: $0,4 D_0 \leq H_0 \leq 0,6 D_0$

- D_{\max} granulats: 5 mm

Trois phases sont parfaitement identifiables sur la courbe d'un essai de retrait. On constate en effet que la courbe obtenue peut se schématiser en deux parties linéaires reliées par une courbure intermédiaire.

-le premier segment de droite correspond à un départ de l'eau qui entraîne un rapprochement des grains entre eux. Cette variation constante est relativement importante. La pente de cette droite correspond au coefficient de retrait linéaire R_l . Durant cette phase le sol n'a pas soumis une désaturation importante.

-l'inflexion de la courbe coïncide avec l'apparition de l'air au sein du sol qui n'est plus saturé.

-le second segment montre une variation de volume faible voire nulle.

Les grains sont rentrés en contact et cette variation de volume ne peut résulter que d'une déformation des grains ou d'un réarrangement de ces derniers. Il est possible de déterminer un point d'inflexion entre les deux droites; la teneur en eau correspondant à ce point théorique est appelée limite de retrait effective W_{re} .

On admettra qu'en dessous de cette limite une diminution de teneur en eau du sol ne produit pratiquement plus de variation volumique. [52]

3.3.5 Essais de masse volumique :

On entend par masse volumique apparente (Kg/m^3), la masse de l'unité de volume du matériau à l'état naturel (pores et vides compris), après passage à l'étuve à 105°C noté M_v

Elle est caractérisée par la moyenne arithmétique des masses volumiques mesurées sur au moins 6 éprouvettes selon la norme algérienne NA 5022. [34]

$$M_v = \frac{M_{vi}}{6}$$

La masse volumique de chaque éprouvette est donnée par la formule :

$$M_{vi} = \frac{M_i}{V_i} \times 100$$

Avec :

M_{vi} : masse volumique de l'éprouvette

M_i : masse de l'éprouvette

V_i : volume de l'éprouvette

- La masse : est déterminée par une pesée du matériau.
- Le volume : mesurer les dimensions du matériau de forme régulière par pesée hydrostatique du matériau de forme irrégulière pycnomètre pour matériaux pulvérulents. [2]

3.3.5.1 Principe:

L'essai consiste à mesurer successivement les paramètres masse et volume qui caractérisent un même échantillon de sol.

3.3.5.2 Mode opératoire:

L'essai consiste à sécher puis à mesurer la masse et le volume d'un échantillon. La masse de l'échantillon est obtenue par pesage, après séchage dans une étuve à 105°C , et ensuite on pèse

l'échantillon après refroidissement. Soit M la masse de cette éprouvette. On mesure géométriquement le volume de l'éprouvette. Soit V ce volume. [53]

3.3.6 Essais de porosité :

La porosité apparente a été déterminée pour les échantillons testes. Cette grandeur est mesurée en suivant la méthode d'Archimède décrite dans la norme ASTM C373Y88. [54]

3.3.6.1 Mode opératoire :

Concernant la procédure ASTM C3739, les échantillons sont découpés au format 20,5 cm × 20,5 cm, pesés et immergé dans l'eau bouillante pendant 5 h. Ensuite, on arrête le système de chauffage on laisse les échantillons immergées dans l'eau pendant encore 24 h (temps d'immersion dans l'eau) pour la saturation. Après cette procédure, l'excès d'humidité sur les surfaces des échantillons sont retirées avec un chiffon humide et leur masse est à nouveau mesurée. [55]

3.3.7 Essai de conductivité thermique :

La morphologie de l'argile est observée par microscopie électronique à balayage. Les particule d'argile sont constituées d'un empilement de plaquettes, présentant des formes plus ou moins rectangulaires avec des contours irréguliers. Ces plaquettes sont formées par un empilement des feuillets, composés majoritairement de silice, aluminium et oxygène. Ces feuillets sont liés entre eux par des liaisons faibles ou par des cations interfoliaires. [54]

3.3.7.1 Essais de détermination de conductivité thermique de l'argile :

La méthode TPS est basée sur la procédure d'un capteur plan à chauffage transitoire, et adaptation la plus courante appelée analyseur de constantes thermiques à disque chaud (hot disk) qui est composé d'un capteur comprend un motif électriquement conducteur en forme de double spirale, qui a été gravé sur une fine feuille de métal (nickel). Cette spirale est prise en sandwich entre deux feuilles minces d'un matériau isolant (Kapton, Mica, etc.). [56]

La méthode du disque chaud repose sur l'action d'une sonde opérant à la fois en source de chaleur et en capteur de température. Le circuit en nickel et recouvert d'une couche en mica contraint effectivement un solide à une infime élévation de température et acquiert, après un délai de stabilisation, sa réponse thermique. La chaleur réémise par ce solide entraîne une

variation de résistivité du nickel étant traduite, au moyen d'un pont électrique, en une augmentation de température. La réponse thermique en fonction du temps permet, avec l'aide d'algorithmes, une estimation de la conductivité, de la diffusivité ou bien de la capacité thermique volumique. Les produits soumis à ces mesures ont été confectionnés en forme de doublons, aux dimensions de $8 \times 16 \times 2 \text{ cm}^3$, puis disposés de part et d'autre de la sonde en vue d'éviter une dispersion de la chaleur en dehors de l'échantillon. [57]

3.3.8 Degré d'humidité:

L'humidité résiduelle est définie comme la masse perdue après séchage d'un échantillon, sa mesure permet de déterminer le poids sec de cet échantillon.

- **Choufa Nassima** a séché un échantillon ($m_0 = 10 \text{ g}$) de kaolin dans une étuve à 105°C pendant 24 h puis l'auteur a pesé la quantité jusqu'à ce que le poids reste constant (m). L'humidité (H en % massique) est donnée alors par la formule suivante :

$$H (\%) = (m_0 - m / m_0) * 100$$

3.3.8.1 La capacité de rétention d'eau:

Les échantillons de sol ont été alimentés et séchés dans un four à 105°C pendant 24 h. Le poids du cylindre de terre circulaire (diamètre interne de 5,4 cm et hauteur de 12,7 cm respectivement) a été noté initialement (W_0) et un papier filtre circulaire a été placé à l'intérieur du fond perforé du cylindre. Le cylindre a été rempli de terre séchée et une fois de plus, le deuxième poids du cylindre a été noté (W_1). Le cylindre a été placé dans une pétrification de 10 cm de diamètre contenant de l'eau, pendant environ 12 h pour permettre à l'eau qui pénètre dans le cylindre et sature le sol. Le cylindre a été retiré, essuyé sur la surface extérieure et le poids final (W_2) a été noté. [72]

$$\text{WHC} (\%) = \frac{(W_2 - W_0) - (W_1 - W_0)}{(W_1 - W_0)} \times 100$$

D'où :

W0 = poids de la bouteille vide (g)

W 1 = Poids du cylindre avec la terre séchée (g)

W 2 = Poids du cylindre avec le sol saturé (g)

3.3.8.2 Teneur en humidité (%) [72] :

$$\text{Teneur en humidité (\%)} = \frac{I - F}{I} \times 100$$

D'où :

I = poids initial de l'échantillon de sol (g)

F = poids final de l'échantillon de sol séché (g)

Les auteures ont rapporté les résultats suivants :

La capacité de rétention d'eau (21,5 à 43,14) et la teneur en humidité (3,36 à 8,19) ont augmenté avec l'éloignement de l'usine.

3.4 Conclusion:

Après la présentation des différentes caractéristiques des matériaux, des méthodes et d'appareillages utilisés dans cette étude, nous présenterons dans le chapitre suivant les résultats obtenus et rapportés par différents auteurs et chercheurs.

Chapitre IV

SYNTHESE DES RESULTATS

4 CHAPITRE IV SYNTHÈSE DES RESULTATS

4.1 Introduction :

Ce chapitre est consacré à la présentation une synthèse des résultats expérimentaux obtenus du programmes d'essais et d'analyses sur les argiles et les CKD rapportées par différents auteurs et chercheurs.

4.2 Résultats de l'essai des limites d'atterberg :

4.2.1 Limite d'atterberg de l'argile : (Norme NF P 94-051) [59] :

Cet essai a pour but de déterminer les deux limites (limite de liquidité et limite de plasticité), les limites d'Atterberg sont des paramètres géotechniques destinés à identifier un sol et caractériser son état au moyen de son indice.

- **MEKHERMECHE Abdessalam** a réalisé des essais au laboratoire de travaux publics de sud L.T.P.S OUARGLA .Et il a établi les résultats suivants :

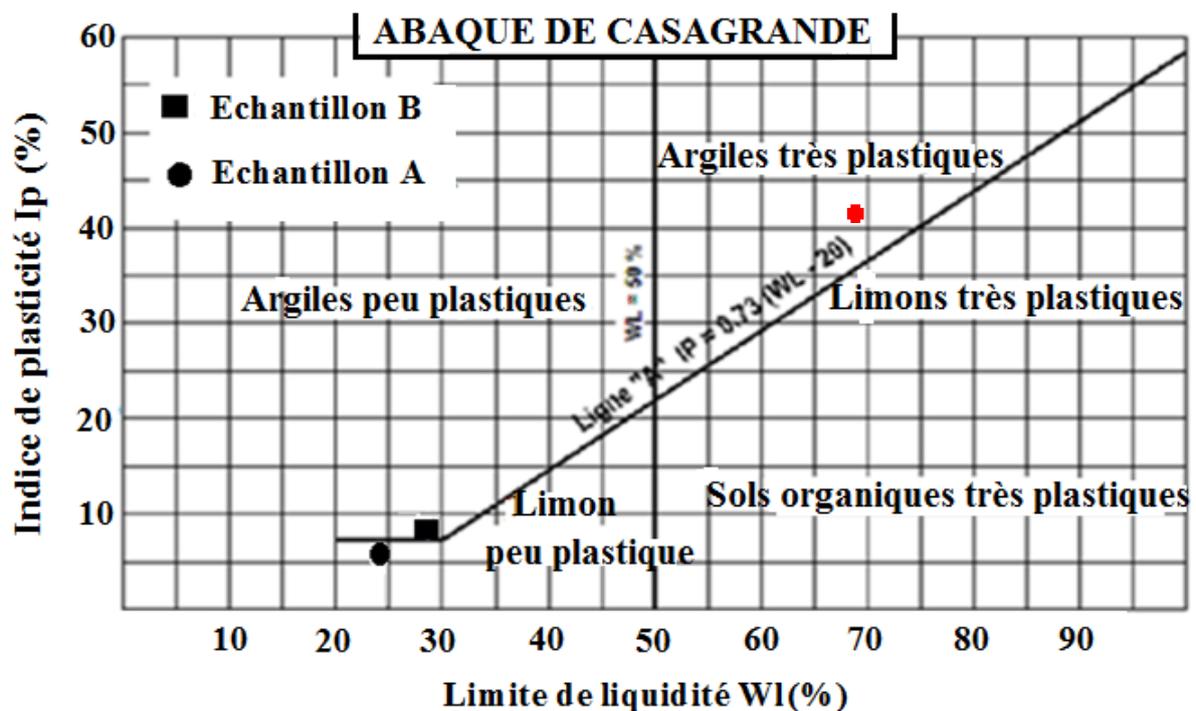


Figure4 1: Abaques de CAZAGRANDE de l'argile.

Tableau4 1: Résultats d'essais de limites d'Atterberg. [60]

Limites D'Atterberg	Valeur (%)
Limite de liquidité WL	68,75%
Limite de plasticité WP	26,54%
Indice de plasticité IP	42.21%

4.2.1.1 Classification des argiles selon Atterberg :

Atterberg (1973) classe la plasticité des argiles en trois niveaux comme montrés dans le tableau suivant.

Tableau4 2: Classification des argiles selon Atterberg. [60]

IP (%)	< 7	7 à 17	> 17
Plasticité	Faible	Moyenne	Elevée

Donc d'après les résultats de l'essai Atterberg (IP = 42.21) on peut classer cette argile comme étant une argile très plastique.

Tableau4 3: Résultats d'essais de limites d'Atterberg pour argile non traité. [61]

Limites D'Atterberg	Valeur (%)
Limite de liquidité WL	34.5%
Limite de plasticité WP	24,1%
Indice de plasticité IP	10.4%

D'après les résultats (IP = 10.4%) cette argile est classifiée comme une argile assez plastique.

4.2.2 limite d'Atterberg de l'argile+ CKD :

- **BAGHDADI ZAKIA** a mené une recherche sur l'utilisation de la poussière de four dans la stabilisation de l'argile. Des CKD ont été testés pour de diverses propriétés géotechniques, comme la résistance à la compression, Proctor (ρ_{dmax} - W_{opt}), limite de liquidité (WL), limite de plasticité (WP), Indice de plasticité (IP) et la résistance au cisaillement. Cette auteure a rapporté que l'ajout de CKD à un sol fortement plastique

(kaolinite) réduit son plasticité et par conséquent améliorer son ouvrabilité, augmente sa densité sèche maximale (pdmax) et réduit sa teneur en eau optimale (Wopt) par contre augmente sa résistance à la compression proportionnellement au pourcentage d'ajout

- La poussière de four CKD par Arabian Cement CO., Jeddah, Arabie saoudite, a été utilisé dans cette recherche, avec une granulométrie comprend entre 6 et 100 microns et une densité spécifique de 2,75. Le tableau suivant résume les propriétés chimiques des CKD et la kaolinite pure.

Tableau4 4: Analyse chimique de la poussière de four et de la kaolinite pure. [62]

	Poussière de four ^a	Kaolinite ^b
Perte d'allumage	26%	13.32%
SiO ₂	13.94%	46.29%
Al ₂ O ₃	4.74%	35.67%
TiO ₂	2.52%
Fe ₂ O ₃	2.36%	0.72%
CaO	45.9%	0.83%
MgO	2.15%	0.15%
SO ₃	2.14%
NA ₂ O	1.03%	0.38%
K ₂ O	1.71%	0.12%
Total	99.97%	100%
Free CaO	5.33
SO ₄ ⁻	0.38%
Cl ⁻	2.48%	0.14%
Finess(4900%)	6.0%
Blaine cm ² /gm	3303

^a : Fourni par Arabian cement Co

^b : Fourni par Saudi Ceramic Co

- **Zakia baghdadi** a étudié l'effet des CKD sur les limites d'atterberg. Des quantités différentes de CKD ont été ajoutées à la kaolinite mais ces mélanges ont donné des résultats faibles (peu de changement dans les indices de plasticité).

L'auteur a choisi d'utiliser un autre type d'argile « la bentonite » en raison de sa haute nature plastique. Des pourcentages de CKD de 0.5, 1.0, 4.0 et 8.0 ont été ajouté à la bentonite. Les résultats de cet essai sont consignés dans la figure suivante.

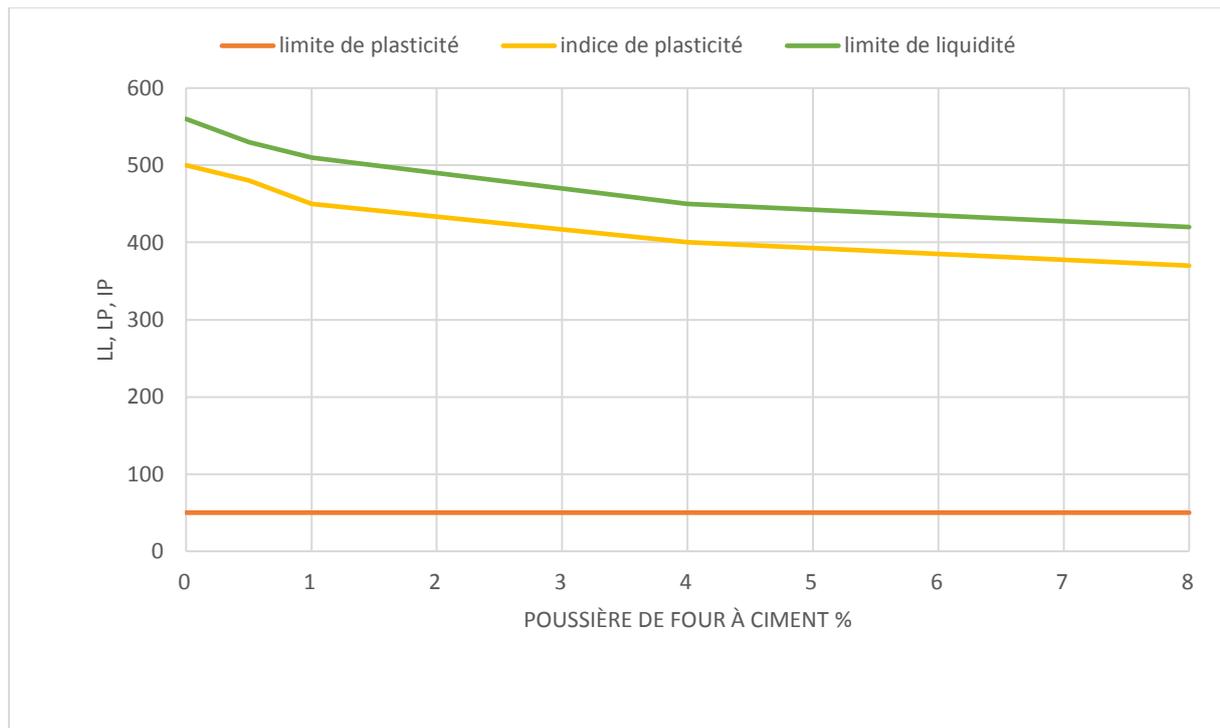


Figure4 2: Effet du traitement de la poussière du four sur la limite de liquide, la limite de plastique et l'indicateur de plasticité de la bentonite. [62]

D'après les résultats suivant en remarque que :

L'ajout de CKD à l'argile affectait sa plasticité qui diminue à un rythme plus lent que les limites de liquidités.

Les valeurs des limites de liquidité ont considérablement diminué avec l'augmentation des quantités des CKDs.

L'effet net était une réduction considérable de l'indice de plasticité de l'argile en raison d'augmentation de l'ajout des CKDs.

4.3 Résultats des essais de flexion et compression :

- **Lukáš Kalina et al.** Ont étudiés l'influence des CKD sur la résistance d'argile à la flexion et à la compression.

Le développement des résistances à la compression et à la flexion démontre les effets positifs de la CKD sur les propriétés mécaniques. Comme l'indique la figure 4.3 (a), l'ajout de CKD n'augmente que légèrement les résistances à la compression initiales après 1 et 7 jours. Cependant, une amélioration perspicace a été obtenue après 28 jours, lorsque tous les échantillons avec l'ajout de CKD jusqu'à 20 % en poids ont indiqué des résistances plus élevées

par rapport à l'échantillon de référence. Inversement, la substitution de 25 % en poids de BFS par du CKD diminue la résistance à la compression, ce qui est principalement lié à une perte très rapide de l'aptitude au façonnage ; ce mélange n'est façonnable que pendant quelques minutes, comme le montre la figure 4.3 (b). Cela influence fortement l'homogénéité des échantillons.

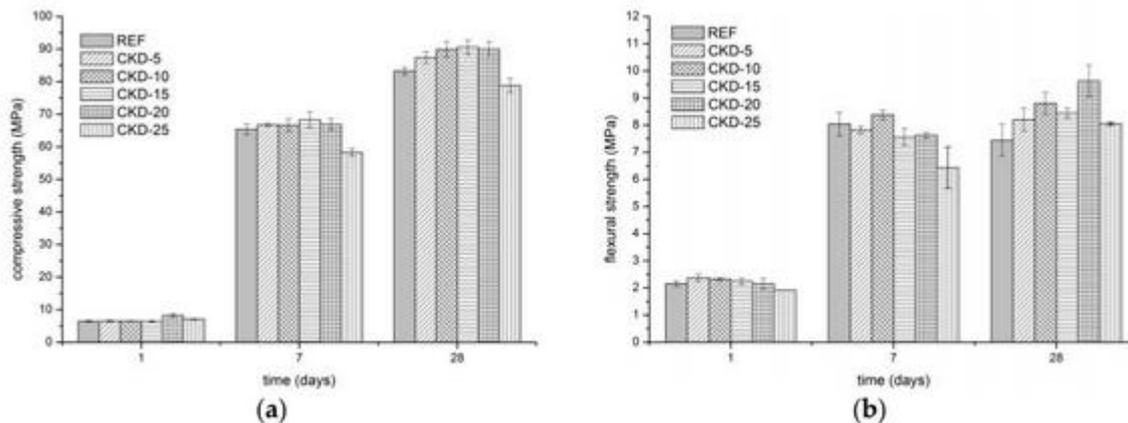


Figure4 3: Développement des résistances à la compression (a) et à la flexion (b) des mortiers activés par les alcalis avec différentes quantités de CKD. [63]

- **Zaki A, Baghdadi** a mené une étude afin d'explorer l'effet de l'addition de poussière de four sur les résistances à la compression de l'argile kaolinite. Les résultats dévoilent que L'augmentation de la résistance à la compression du la kaolinite est proportionnel au pourcentage de CKD ajouté (1, 4, 8,12 et 16% de CKD).

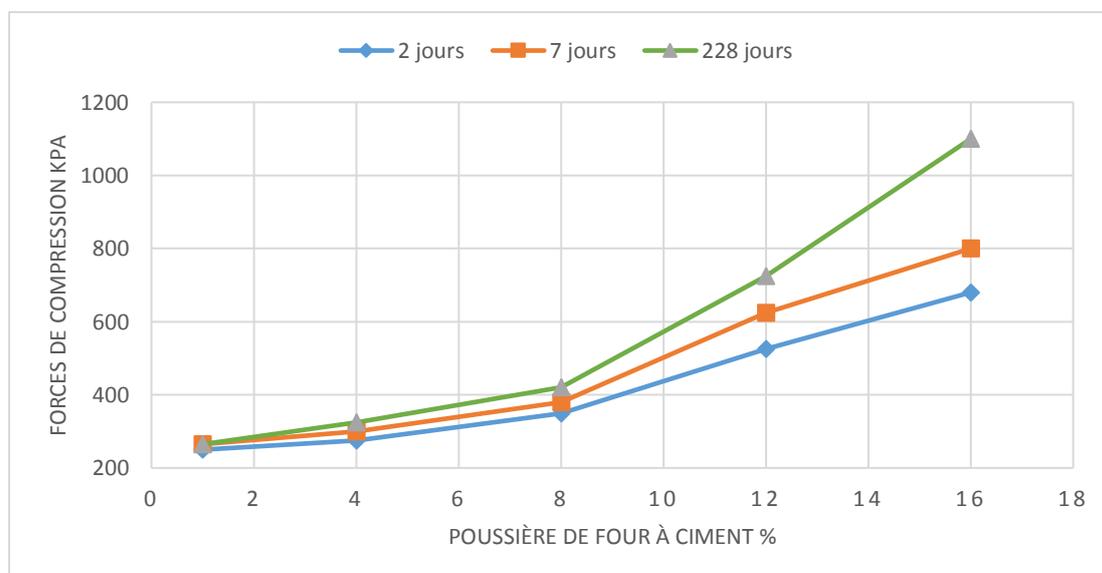


Figure4 4: Résistance à la compression de la kaolinite traitée avec de la poussière de four et durcie pendant 2, 7 et 28 jours. [62]

4.4 Résultats des essais de la masse volumique apparente :

Pour étudier l'influence des CKDs sur les propriétés de l'argile **Zakia Baghdadi** à utiliser les tests de Proctor standard (ASTM 0-698) (Figure4.5).

Les résultats obtenus par cet essai indiquent que :

- L'ajout de CKD à la bentonite réduit sa plasticité et donc elle améliore sa maniabilité.
- Les CKDs a entainé une amélioration des densités sèches maximales et une réduction des teneurs optimales en eau de l'argile Kaolinite.

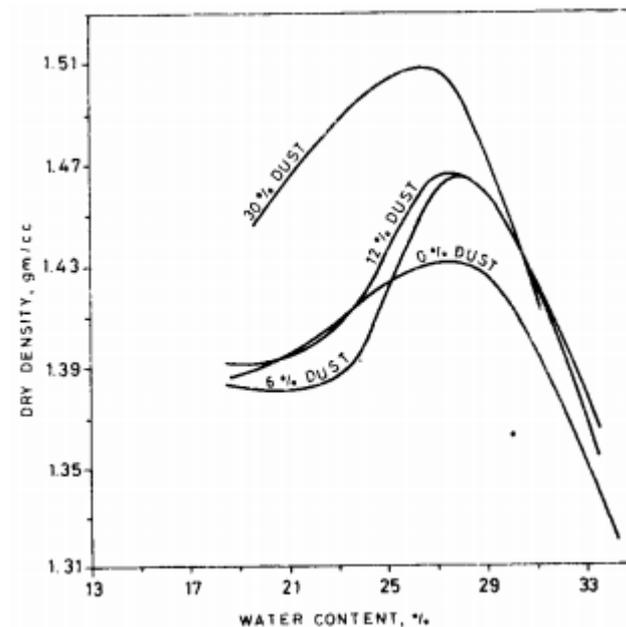


Figure4 5: Courbes de compactage Proctor standard de la kaolinite traitée avec de 6,12 et 30% de poussière de four. [62]

4.5 Résultats de l'essai de degré d'humidité :

- **Pooja Solanki et Suman Kumari Parihar** ont menées une étude sur l'analyse physico-chimique d'échantillons de sol prélevés dans cinq zones différentes des cimenteries de **Shree**. Paramètres physiques et chimiques comme la capacité de rétention d'eau, la teneur en humidité et les métaux lourds. [72]
- **Parthasarathy et al.** Ont étudiées les propriétés physiques des sols exposés à la poussière de four à ciment et ont observés une diminution de la capacité de rétention d'eau et de l'espace interstitiel et une augmentation de la conductivité thermique et de la chaleur spécifique. [73]

Tableau4 5: Caractéristiques physico-chimiques du sol à différents endroits et à différentes profondeurs (saison des pluies) à Shree cement Ltd. Beawar (Ajmer). [69]

S.NO	Sites	Profondeurs	W.H.C. (%)	Teneur en		
				humidité (%)	pH du sol	Carbone organique
1.	près de la zone de l'usine	Surface	21.5	3.36	8.70	1.25
		20 cm	28.1	4.70	8.50	1.15
		30 cm	30.0	4.90	8.49	1.9
2.	½ km	Surface	20.1	3.30	8.32	1.21
		20 cm	25.5	4.45	7.96	1.13
		30 cm	28.2	4.60	7.59	1.04
3.	1km	Surface	17.8	2.50	9.00	1.50
		20 cm	22.5	4.30	8.01	1.20
		30 cm	24.1	4.50	8.00	0.97
4.	2km	Surface	20.50	3.03	8.03	1.30
		20 cm	29.5	4.49	7.93	1.18
		30 cm	32.5	4.78	7.92	0.99
5.	3km	Surface	27.83	3.65	7.49	1.12
		20 cm	35.38	7.75	7.38	1.08
		30 cm	43.14	8.19	7.00	0.75

4.6 Conclusion

L'étude menée dans ce chapitre vise à exposer quelques propriétés chimiques, mécaniques et thermodynamique des argiles et les CKD.

Il ressort de cette étude que :

- L'utilisation des CKD dans les argiles provoque une diminution sensible de l'indice de plasticité et une diminution de la limite de liquidité par conséquent elle augmente l'ouvrabilité des sols hautement plastiques ;

- L'utilisation des CKD dans les argiles augment la résistance à la flexion et la résistance à la compression;
- L'ajout des CKD dans les argiles augmente la masse volumique sèche et diminue la teneur en eau ;
- Les CKD réduits la porosité et le retrait ;

Les CKD augmentent la conductivité thermique par contre diminuent la capacité de rétention d'eau ;

CONCLUSION

GENERALE

5 CONCLUSION GENERALE

Les enseignements qu'on doit tirer dans Synthèse des résultats obtenus par des différents auteurs dans la littérature :

- D'après DATTA et al, et Zakia BAGHDADI : l'ajout de CKD à l'argile affectait sa plasticité et une réduction considérable de l'indice de plasticité en raison d'augmentation de l'ajout des CKDs.

Cette réduction de plasticité indique que les CKDs pourrait être utilisée pour augmenter la maniabilité des sols hautement plastiques, ouvrabilité améliorée, accélère la manipulation et le placement ultérieurs, améliore la densité sèche maximal et réduit la teneur en eau de l'argile.

- D'après Lukas KALINA, Vlastimil BILEK JR et Tomas KIRIPOLSKY :

Augmentation de la résistance de l'argile est proportionnel à l'augmentation de l'ajout des CKDs.

Laitier de haut fourneau avec CKD influence le processus d'hydratation dans le sens s'une création de phase de liante plus élevée qui affecte positivement les propriétés mécaniques jusqu'à une certaine limite.

- D'après Zakia BAGHDADI, Lukas KALINA et al, Sulapha PEETHAMPARAN et S. PAVIA :

La résistance à la compression de la pâte de CKD hydratée et la température d'hydratation elle-même fournissent une bonne indication de la performance de ces CKD lorsqu'ils sont utilisés comme stabilisants du sol.

Comme prévu, les CKD à haute teneur en chaux libre ont considérablement amélioré la résistance à la compression non confinée de l'argile. Bien qu'ils ne soient pas aussi efficaces que les CKD à haute teneur en temps libre, ils étaient néanmoins capables d'augmenter la

CONCLUSION GENERALE

résistance de l'argile kaolinite de 100 à 300% après 7 jours de cure. Par conséquent, ces CKD peuvent également être qualifiés de stabilisants potentiels pour les argiles kaolinites.

Le développement de la résistance, augmentant proportionnellement à la quantité de CKD lorsque l'addition est supérieure à 5%,

- D'après Raymond DUPAIN, Jean- Claude SAINT-ARROMAN :

L'ajout des CKDs dans l'argile diminue la teneur en eau optimale et augmente la densité sèche maximale.

- D'après S. PAVIA et D. REGAN :

L'ajout de CKD diminue considérablement la porosité des mortiers.

- D'après Pooja SOLANKI, Suman KUMARI PARIHAR :

Capacité de rétention d'eau et teneur en humidité, les résultats sont indiqués en capacité de rétention d'eau et la teneur en humidité augmentaient.

BIBLIOGRAPHIE

BIBLIOGRAPHIE

[1] **HABOUL, S.** « Etude de l'influence du gypse et de la pouzzolane sur les propriétés du ciment ». Thèse Doctorat Université de Bouira 2018.

[2] **Chelouah. N** Cours de MDC I. Année 2013/2014.

[3] <http://www.universalis.fr/encyclopedie/ciment/>, article sur « historique du ciment ». **DARBOIS. B, ROTHLAUF. W**, « CIMENT », *Encyclopædia Universalis* [en ligne], consulté le 22 juillet 2020.

[4] <https://www.infociments.fr/syndicat-francais-de-lindustrie-cimentiere-sfic>, **Raoul de Parisot**, Président du Syndicat Français de l'Industrie Cimentière, « L'INDUSTRIE CIMENTIÈRE FRANÇAISE et LA RÉDUCTION DES ÉMISSIONS De CO₂ », article publier le Avril 2018.

[5] **RENAUT. M**, « Calcination des déchets industriels : synthèse de ciment et stabilisation/solidification des résidus de combustion ». Thèse Doctorat Université d'Artois, 2017.

[6] <https://www.infociments.fr/ciments/fabrication-du-ciment-le-process/la-carriere>, par **MANSOUTRE. S**, « la fabrication du ciment », Article publier le Mai 2019.

[7] <http://www.schb.dz/processus-de-fabrication-du-ciment/>, Societe **Hamma Bouziane**, sur «la fabrication du ciment», article publier le 30/04/2020.

[8] Documentation de la cimenterie de Hamma Bouziane; Le ciment portland.

[9] **BUCCHI. R**, « World Cement Technology: Features on the role of minor compounds in cement clinker », Part II, vol. 12, n06, p. 258-273, 1981.

BIBLIOGRAPHIE

- [10] **MILLER. C.T, BENSCH. D.G, COLONY.D.C**, « Use of cement-kiln dust and fly ash in pouzzolanic concrete base courses ». Transportation Research Record 754, Transportation research board national academy of sciences, p. 36-41. 1980.
- [11] **BHATTY, M.S.Y**, « Use of cement kiln dust in blended cements-aikali-aggregate reaction expansion ». World Cement, vol. 16, N°10, p. 386,388-390,392. 1985
- [12] **RHOUZLANE. S**, « Caractérisation géotechnique des barrières environnementales à base de poussières de four de cimenterie et de cendres volantes ». Thèse de doctorat. Faculté des sciences appliquées, Université de Sherbrooke, 1997.
- [13] Association Canadienne du Cément Portland (**CPCA**), « An Analysis of Selected Trace Metals in Cement and Kiln Dust », USA. 35 p, 1992.
- [14] **BAGHDADI. ZA, RAHMAN. MA**. « The potential of cement kiln dust for the stabilization of dune sand in highway construction », 1990.
- [15] **ROUIS. J**, «Use of the Cement residuel Kiln Dust landfill liner», Cement Industry to Waste Managment. CPCA Conference, 1992.
- [16] **HATIMI. I.D**, « Contrebutions à l'étude physico-chimique de la consolidation des poussières de four de cimenterie par des cendres volantes ». Université de Scherbook (Québec), Canada, 1999.
- [17] **COLLINS. R. J, EMERY. J.J**, « Kiln Dust-fly Ash System for Highway Bases and Subbases », Report FHWA/RD-82/167, 1983.
- [18] Article sur l'histoire des argiles « <https://www.compagnie-des-sens.fr/histoire> ».
- [19] <http://creations-modelage.e-monsite.com/pages/histoire/histoire-de-l-argile.html> , par RAKU et FANTAISIES, sur « l'histoire de l'argile », article consulter juillet 2020.
- [20] **NIGAY.P. M**, « Étude des transformations microstructurales de mélanges argile/biomasse lors de la cuisson et relations avec les propriétés mécaniques et thermiques ». Thèse de doctorat de l'université de Toulouse, 2015.
- [21] **HERNOT. F**, « L'argile, son utilisation à l'officine ». Thèse de doctorat de l'université de Angers, 2016.

BIBLIOGRAPHIE

[22] <https://www.futura-sciences.com/planete/definitions/geologie-argile-1053/>, sur « la géologie de l'argile ». L'article consulter juillet 2020.

[23] **ERRAIS. E**, « réactivité de surface d'argiles naturelles, étude de l'absorption de colorants anioniques ». Thèse de doctorat de l'université de Strasbourg, 2011.

[24] **DIATTA. M. T**, « Matières premières argileuses du Sénégal: caractéristiques et applications aux produits céramiques de grande diffusion », Thèse de doctorat de l'université de Limoges, 23/05/2016.

[25] <https://www.universalis.fr/encyclopedie/argiles/2-les-argiles-dans-le-cycle-geologique-de-l-ecorce-terrestre/>, par **BEAUFORT. D, PAGEL.M**, « ARGILES », *Encyclopædia Universalis* [en ligne], consulté le 25 juillet 2020.

[26] **TRUCHEE. C**. « Caractérisation et quantification des minéraux argileux dans les sols expansifs par spectroscopie infrarouge aux échelles du laboratoire et du terrain ». Thèse de doctorat d'Université Paul Sabatier - Toulouse III, 2010.

[27] **DECARREAU. A**, « matériaux argileux : structure, propriétés et applications », société française de minéralogie et de cristallographie et groupe français des argiles. Pp, 35, 1990.

[28] **VAN DAMME. H, BILDSTEIN. O**, « Hydratation des argiles gonflantes: Séquence d'hydratation multi-échelle Détermination des énergies macroscopiques à partir des propriétés microscopiques ». Thèse de doctorat d'université de PARIS VI- PIERRE et MARIE CURIE U.F.R. DE SCIENCES, 2006.

[29] **AMIROUCHE. L**, « Etude du pouvoir de sorption du Cuivre (II), du Zinc (II) et des polyphénols par les bentonites sous l'effet des irradiations micro-ondes ». Thèse de magister d'université de TIZI-OUZOU

[30] **CAILLERE S., HENIN S. et RAUTUREAU. M**, « Minéralogie des argiles : Classification et nomenclature », tome 2 éd. Masson, p. (9 – 114). P(184 – 189), Paris 1982.

[31] **DALI YOUCEF, L**, « Purification et caractérisation de l'attapulгите Algérienne. Application à l'adsorption du bleu de Méthylène ». Thèse de Magister de l'université d'Oran, 2012.

BIBLIOGRAPHIE

[32] **Rousset. D**, « *Etude de la fraction argileuse de séquences sédimentaires de la Meuse et du Gard. Reconstitution de l'histoire dia génétique et des caractéristiques physico-chimiques des cibles. Aspects minéralogiques, géochimiques et isotopiques* ». Thèse de doctorat, Université Louis Pasteur de Strasbourg, 2006.

[33] **KONRAD. J.M., ALONSO F., GABEZAS.V**, « Caractérisation des particules fines d'un matériau granulaire de fondation par l'essai au bleu de Méthylène ». Rapport GCT, CREIG phase II, mars 2008.

[34] **AREZKI. S**, « Etude de l'influence des ajouts (grignon d'olive et foin) sur les caractéristiques physico- mécaniques de la brique de terre cuite ». Mémoire de magistère de l'université de Bejaia, 2008.

[35] Wikipedia <https://www.wikipedia.org/>

[36] **EL HACHMI. A**, « **Argile et minéraux argileux propriétés physico-chimique et propriétés colloïdes** », Mémoire online ;08/07/2013.

[37] **SALLES. F**, « Hydratation des argiles gonflantes: séquence d'hydratation multi-échelle et détermination des énergies macroscopiques à partir des propriétés microscopiques ». Matériaux. Thèse de doctorat de l'université Pierre et Marie Curie - Paris VI, 2006.

[38] **VULLIET. L, LALOUI. L et ZAHAO. J**, « Mécanique des sols et des roches, avec écoulements souterrains et transferts de chaleur ». (T.G.C volume 18), pp.69-72, 2016.

[39] **ROBERT. D, WILLIAM. D, KOVACS**, « Introduction à la Géotechnique », édition école polytechnique de Monterial, pp. 40-48, 1991.

[40] **MATHIEU. C, LOZET. J**, dictionnaire encyclopédique de « Science du sol, avec index Anglais-Français », édition TEC et DOC, 11 rue Lavoisier Paris, Page 59, 2011.

[41] **TP N°4** mécanique des sols, « détermination des limites de consistance d'un sol ». Licence 2 université de Bab ezzouar.

[42] **GHOMARI. F, LECHGUEUR**, « Science des matériaux de construction ». Cour à l'université ABOUBEKR BELKAID de Tlemcen.

[43] **DERRAR. H, KABBAB. H**, « performances mécaniques des matériaux cimentaires modifiés par ajout de bulles de riz calcinées et broyées ». Mémoire de master d'université 2 de Batna 2019.

BIBLIOGRAPHIE

- [44] **RAHMANI. M. B, SAID. A**, « Influence des caractéristiques minéralogiques des argiles sur la fabrication des briques (Cas gisement TAMADNINE, briqueterie ADRAR ». Mémoire de master d'université de Béjaia, 2018.
- [45] **WETSHONDO OSOMBA. D**, « Caractérisation et valorisation des matériaux argileux de la Province de Kinshasa (RD Congo) ». Thèse de doctorat d'université de Liège, 2012.
- [46] **KHELIFATI. A**, « Caractérisations physico-chimiques des briques spéciales. Département des Mines et Géologie(VRM) », Mémoire de Master, Université A, Mira de Bejaia, 2017.
- [47] **ALIA. A, BAKHMED. A**, « L'effet d'ajout des fibres métalliques sur les propriétés physico-mécaniques des bétons de sable de dunes » Mémoire De Magister, Département De Génie Civil, Université Kasdi Merbah – Ouargla, 2017.
- [48] <https://www.geotechnique-journal.org/articles/geotech/pdf/2007/03/geotech2007120-121p107.pdf> , **J.-F. SERRATRICE**, « Retrait-gonflement des sols argileux et des marnes ». p117,2007.
- [49] **PHILIPPONNAT. G**, « Retrait-gonflement des argiles, proposition de méthodologie ». Revue Française géotechnique, N°57, pp. (5-22), octobre1991.
- [50] **Document public**, « Cartographie de l'aléa retrait-gonflement des sols argileux dans le département de la Drôme ». Rapport final BRGM/RP-56648-FR, Octobre 2008, Étude réalisée dans le cadre de l'opération de service public 06RISD29 du BRGM.
- [51] **MAGNAN, COJEAN, CUI et MESTAT**, « Essai de retrait pour une meilleure classification de la sensibilité des sols à la sécheresse », Editions du LCPC, Paris, 2008.
- [52] **ARVOR** Géotechnique Ingénierie des sols et des fondations, Essai de dessiccation « Détermination effective de la limite de retrait sur un prélèvement non remanié (NF P 94-060-2) ». Fiche: MPL-FT-08Indice A, 2011.
- [53] <http://www.geoslab.fr/Masse-volumique-sol-fin-roche.php>, « Détermination de la masse volumique des sols fins et d'un élément de roche », article consulter juillet 2020.
- [54] **BORIES. C**, « Etude des caractéristiques d'un Porogene d'origine bio-source et mécanismes mis en œuvre pour l'obtention d'une brique de construction micro poreuse à haut performance thermique et mécanique ». Thèse de doctorat de l'université de Toulouse, 2015.

BIBLIOGRAPHIE

[55] WATER KEMPER. A, VIEIRAA. M, DE MELLO. D I, E. Mendes et les autres.

« Comparison of Methods for Determining the Water Absorption of Glazed Porcelain Stoneware Ceramic Tiles », document de Materials Research, 2017.

[56] ASHRAF. A, « Thermal Conductivity Measurement by Hot Disk Analyser». Université de Qatar.

[57] NIGAY. P.M, « Étude des transformations microstructurales de mélanges argile/biomasse lors de la cuisson et relations avec les propriétés mécaniques et thermiques ». Thèse de doctorat de l'université de Toulouse, 2015.

[58] EL YAKOUBI. N, « Potentialités d'utilisation des argiles marocaines dans l'industrie céramique : cas des gisements de Jbel Kharrou et de Benhmed (Meseta marocaine occidentale) ». Thèse de doctorat d'université de MOHAMMED V-AGDAL RABAT, 2006.

[59] DUPAIN. R, SAINT-ARROMAN. J. C, « Granulats, Sols, Ciments et Bétons, caractérisation des matériaux de génie civil par les essais de laboratoire ». Edition Casteilla, 2009.

[60] MEKHERMECHE. A, « Contribution à l'étude des propriétés mécaniques et thermiques des briques en terre en vue de leur utilisation dans la restauration des Ksours sahariennes », Thèse de Magister, de l'université de OUARGLA, 2012.

[61] CHAHLATE. Z, MOKADDEM. A, « L'Ajout de poussière des fours de ciment (CKD) et les fines de Carrière ». 2017.

[62] BAGHDADI. Z, « Utilization of Kiln Dust in Clay Stabilization ». Journal of King Abdul-Aziz University: Engineering and Science, Vol. 2, pp. 153-163, 1990.

[63] MAKKI. L, DUC. M, DRONIUC. N & REIFFSTECK. Ph et les autres, « Essai de retrait pour une meilleure classification de la sensibilité des sols à la sécheresse », Magnan, Cojean, Cui et Mestat (ed.), Editions du LCPC, Paris, 2008.

[64] KALINA. L, BILEK JR. V, KIRIPOLSKY. T et les autre, « Cement Kiln By-Pass Dust: An Effective Alkaline Activator for Pozzolanic Materials ». Article en libre accès distribué sous les termes et conditions de la licence Créative Commons Attribution (CC BY), Licencié MDPI, Bâle, Suisse, 2018.

BIBLIOGRAPHIE

- [65] **MICHOT. A**, « Caractéristiques thermo physiques de matériaux à base d'argile : évolution avec des traitements thermiques jusqu'à 1400°C ». Thèse Doctorat de l'université de LIMOGES, 2008.
- [66] **BENDAHIR. F, ELFODDA. Kh.** « Caractérisation thermo-physique des matériaux locaux à base d'argile ». Thèse de magistère de l'Université Ahmed Draia Adrar, 2017.
- [67] **BOUSSAADA, BEN ALI**, « Caractérisation thermomécaniques des matériaux locaux à base d'argile », mémoire de master, université Adrar, 2016
- [68] **CHOUFA. N**, « Epuration des eaux usées: l'élimination des micropolluants dans les eaux usées par un matériau argileux », Mémoire de Magister de l'université Mohammed Chérif Messaadia Souk Ahras , 2013.
- [69] **BHATTY, M.S.Y**, « Properties of Blended Cements made with Portland Cement, Cement Kiln Dust, Flyash, and Slag ». Proceedings of the 8th International Congress on the Chemistry of Cement, Brazil, Vol. IV, pp. 118-127, 1986.
- [70] **OM SHERVAN. Kh**, « Characterization and utilization of cement kiln dusts (CKDs) as partial replacements of Portland cement », 2009.
- [71] **PAVIA.S, REGAN. D**, « Influence of cement kiln dust on the physical properties of calcium lime mortars ». Materials and Structures/ Matériaux ET Constructions. 43. 381-391, 2009. 10.1617/s11527-009-9496-9.
- [72] **POOJA. S, SUMAN. K.P**, « Effect of Cement Kiln Dust on Some Properties of Soil », I. JARSE, Vol .06, Issue No.11, November 2017.
- [73] **PARTHSARATHY. S, ARUNACHALAM. N, NATARAJAN. K and RANGASAMY. G**, « Effect of cement dust pollution on certain physical parameters of maize crop and soil ». Indian J. Environ. Hlth. 17 , pp 114-200, 1970.
- [74] **GHOUZLANE S.**, « Conception et caractérisation des géotechnique des barrières environnementales à base des poussières de four de cimenterie et des cendres volantes ». Université de Scherbook (Québec), Canada, 1997.
- [75] **HATIMI I.D.**, « Contrebutions à l'étude physico-chimique de la consolidation des poussières de four de cimenterie par des cendres volantes ». Université de Scherbook (Québec), Canada, 1999.].

BIBLIOGRAPHIE

[76] **KLEMM, W.**, « Cement kiln dust: a look at its uses and characteristics », Proceedings of the 29th International cement seminar, U.S.A, 1993.

[77] **Al-Shaded, Sabah. HAMAD, O.** « Investigation of cement dust from Iraqifactories », PhD. Thesis, University of Technology, 2009.

BIBLIOGRAPHIE