

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Ibn Khaldoun –Tiaret–



FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUÉES DÉPARTEMENT GÉNIE CIVIL

Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme de Master

Spécialité : Génie civil

Option : Géotechnique

Présenté par :

ASNOUN Ikram

&

KADDOUR BEY Mohamed yassine

Sujet du mémoire

Utilisation d'une argile calcinée pour la préparation d'une matrice cimentaire

Soutenu publiquement le 20 juin 2024 devant le jury composé de :

Mr : B. SERBAH	Université de Tiaret	Président
Mme : A . DRAOUI	Université de Tiaret	Encadreur
Mr : H.BEKKI	Université de Tiaret	Examineur
Mme : L.KHAROUBI	Université de Tiaret	Examineur
Melle : Z.RENNEK	Université de Tiaret	Examineur

PROMOTION : 2023/2024

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Remerciments

Allah le bénéfique soit loué et qu'il nous guide sur la bonne voie

*Ainsi nous remercions notre encadreur **Mme DRAOUI Aïcha**, pour tous ses conseils et ses orientations pour la réalisation de ce travail.*

Aux membres du jury qui ont bien voulu lire et évaluer le présent Mémoire

Nos remerciements aux enseignants du département de génie génie civil pour leurs aides et orientations .

Et à tous ceux qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.



Dédicace

*Je dédie ce travail à mes très chers parents pour tout
Le soutien sacrifices et leure tendresse et que dieu pralonge sa vie.
Ma sœur houria et à mon frère Amine
Pour leur encouragement et que dieu le tout puissant vous protégé et vous garde.
A toute mes membres de familles à mes grands pères
et oncles tantes mes cousins et mes cousines
Et mon binôme kaddour bey Mohamed Yassine
A tous mes enseignant*

Asnoun ikram



Dédicace

Je dédie ce travail à mes très chers parents pour tout

Le soutien sacrifices et leur tendresse et que dieu prolonge sa vie.

Mes sœurs et à mon frère pour leur encouragement et que dieu le tout puissant vous
protégé et vous garde. A toute mes membres de familles à mes grands pères

et oncles tantes mes cousins et mes cousines Et mon binôme Asnoun ikram

A tous mes enseignant

KADDOUR bey Mohamed
Yassine



Résumé

La production d'une tonne de ciment, génère environ une tonne de gaz à effet de serre, ce qui représente 5% à 8 % des émissions totales de dioxyde de carbone dans le monde. La plupart de ces émissions proviennent de la décarbonatation du calcaire, nécessaire à la fabrication du clinker Portland, et de l'utilisation de combustibles fossiles pour alimenter le four à ciment, qui produit en plus des gaz carboniques, des oxydes d'azote dont les effets sur l'environnement sont très graves. Pour pallier cette problématique environnementale, une des solutions prometteuses est d'utiliser du ciment composé qui réduit la teneur en clinker dans le ciment en le remplaçant par des nouveaux matériaux sans nuire la qualité des matrices cimentaires. Ce travail expérimental étudie les avantages et la possibilité de substitution partielle du ciment par l'ajout de l'argile calcinée dans le mortier. Cette étude expérimentale consiste à préparer un mortier, en remplaçant un certain pourcentage de ciment par l'ajout d'une argile calcinée à 850 C°, (5%, 10%, 15% et 20%). Les propriétés mécaniques du mortier à l'état durcis (la résistance mécanique à la compression et à la traction par flexion a trois points), ont été déterminé. D'après les résultats expérimentaux obtenus, il ressort que la quantité d'ajout argile calcinée est un paramètre qui influent sur la variation des résistances mécaniques des mortiers testés.

Mots clé : Mortier, ciment, argile, calcination, résistance de compression, résistance de traction

Abstract

The production of one ton of cement, generates about one ton of gases, which represents 5% to 8% of total carbon dioxide emissions worldwide. Most of these emissions come from the decarbonization of limestone, necessary for the manufacture of Portland clinker, and the use of fossil fuels to power the cement kiln, which produces in addition to carbon dioxide, nitrogen oxides whose effects on the environment are very serious. To overcome this environmental problem, one of the promising solutions is to use composite cement that reduces the clinker content in cement by replacing it with new materials without affecting the quality of cement matrices. This experimental work studies the advantages and the possibility of partial substitution of cement by the addition of calcined clay in the mortar. This experimental study consists in preparing a mortar, replacing a certain percentage of cement by the addition of a clay calcined at 850 C°, (5%, 10%, 15% and 20%). The mechanical properties of the mortar in the hardened state (the mechanical resistance to compression and bending pull has three points), were determined. From the experimental results obtained, it appears that the amount of calcined clay addition is a parameter that influences the variation of the mechanical strengths of the mortars tested.

Keywords: mortar, cement, clay, calcination, compressive strength, tensile strength

ملخص

ينتج عن إنتاج طن واحد من الأسمنت حوالي طن واحد من غازات الاحتباس الحراري، وهو ما يمثل 5 إلى 8٪ من إجمالي انبعاثات ثاني أكسيد الكربون في جميع أنحاء العالم. تأتي معظم هذه الانبعاثات من تحلل وانتشار الكربون من الحجر الجيري، الضروري لتصنيع بورتلاند كلينكر، واستخدام الوقود الأحفوري لتشغيل فرن الأسمنت، الذي ينتج بالإضافة إلى ثاني أكسيد الكربون، أكاسيد النيتروجين التي تكون آثارها خطيرة للغاية على البيئة. للتغلب على هذه المشكلة البيئية، تمثل أحد الحلول الواعدة في استخدام الأسمنت المركب الذي يقلل من محتوى الكلنكر في الأسمنت عن طريق استبداله بمواد جديدة دون التأثير على جودة مادة الأسمنت. يدرس هذا العمل التجريبي مزايا وإمكانية الاستبدال الجزئي للأسمنت بإضافة الطين المكلس. تتكون هذه الدراسة التجريبية من إعداد الميلاط، باستبدال نسبة معينة من الأسمنت بإضافة طين المعالج حرارياً (5٪، 10٪، 15٪، 20٪) عند 850 درجة مئوية. تم تحديد الخصائص الميكانيكية للميلاط في الحالة الصلبة (المقاومة الميكانيكية للضغط وسحب الانحناء ذات ثلاث نقاط). من النتائج التجريبية التي تم الحصول عليها أن كمية إضافة الطين المكلس تؤثر على تباين نقاط القوة الميكانيكية للميلاط التي تم اختبارها .

الكلمات الرئيسية: الميلاط، الأسمنت، الطين، التكلينس، قوة الضغط، قوة الشد.

Sommaire

Remerciement	I
Dédicace	II
Résumé	IV
Liste des tableaux	V
Liste des figures	VI
Liste des abréviations	VII
Introduction générale	01

Chapitre I : Généralité sur le mortier

I-1. Introduction	03
I.2. Définition de mortier	03
I .3 Les compositions de mortier	04
I .3.1 Le Ciment	04
I .3.1.1 Historique de ciment	04
I .3.1.2 Définition	05
I .3.1.3 fabrications du ciment	06
I .3.1.3.1 Extraction et préparation des matières premières	06
I .3.1.3.2 Le séchage et le broyage	06
I .3.1.3.3 Obtention de clinker	07
I .3.1.3.4 La voie humide	07
I .3.1.3.5 La voie semi –humide	07
I .3.1.3.6 La voie séchée	07
I .3.1.3.7 Obtention du ciment	07
I .3.1.4 Composition du ciment	08
I .3.1.4.1 la Composition chimique du ciment	08
I .3.1.4.2 La composition minéralogique	08
I .3.1.4.2.1 Les phases majeures	08
I .3.1.4.2.2 Les constituants mineurs	09
I .3.1.5 Hydratation du ciment	10
I .3.1.5.1 Hydratation des silicates de calcium ,C ₃ S ,et C ₂ S	11
I .3.1.5.2 Hydratation des aluminates de calcuim C ₃ A ET C ₄ AF	11
I.3.1.6 Secteur de production des ciments en Algérie	12

I.3.1.6.1 Historique de fabrication des ciments en Algérie	13
I.3.1.6.2 Consommation de l'énergie électrique de l'industrie de production des ciments	16
I.3.1.6.3 Dégagements de dioxyde de carbone par les cimenteries	16
I.3.1.6. 4 La réduction du taux de clinker dans le ciment	18
I .3.1.7 L'impact de ciment sur l'environnement	18
I .3.1.7.1 La source de CO2 dans l'industrie cimentière	19
I .3.1.7.2 Réduction des gaz à effet de serre dans l'industrie du ciment	19
I .3.1.7.3 Protection de l'environnement	19
✓ Valorisation énergétique	20
✓ Valorisation matière	20
✓ Protection des eaux	20
✓ La réhabilitation des carrières	20
I .3.1.7.4 Réduction de la consommation énergétique et l'émission de CO ₂	20
I .3.1.7.5 Domaines d'utilisation du ciment.....	21 I
I.3.2 Le Sable.....	21
I .3.3 L'eau.....	22
I .3.4 La chaux	22
I .4 Les types de mortier	22
I.5 Le domaine d'utiliser le mortier	25
I. 6 Conclusion.....	25

Chapitre II : L'argile et la calcination

II .1 Définition et Origine	27
II .2 Les différentes couleurs d'argile.....	28
II .3 Les différents types d'argile	29
II .3.1 La kaolinite	30
II .3.2 illite	31
II .4 Classification des argiles	32
II .4.1 Minéraux à 7 Å	33
II .4.2 Minéraux à 10 Å	36
II .4.3 Minéraux à 14 Å	38
II .5 Propriétés physicochimiques d'argile	40

• La capacité d'échange cationique	40
• Gonflement d'argile	41
• Pouvoir d'adsorption des polluants	41
II .6 Calcination d'argile	42
II .6.1 La calcination flash	43
II .6.2 La calcination lente	43
II .7 Conclusion	44

Chapitre III : Caractérisation des matériaux

III.1 Introduction.....	46
III.2 Caractérisation des matériaux utilisée.....	46
III.2.1 Le ciment CEMI	45
III.2.1.1 Essai de consistance et prise de ciment	47
➤ Mode opératoire	47
III.2.2 Le sable	49
III.2.2.2 Masse volumique Apparente et le volume absolu ou en varc :	52
➤ Equipement et matériaux	52
➤ Mode opératoire	53
➤ Calculs et résultats	54
III.2.2.3 Equivalent de sable	54
III.2.2.4 Bleu de méthylène	56
✓ Le principe et le but de bleu de méthylène	57
✓ Valeur de bleu de méthylène et catégorie de sol	58
✓ Le résultat	58
III.2.3 L'argile.....	58
III.2.2.4 Préparation de mortier.....	60
✓ Préparation de mortier	60
✓ Matériaux utilisés	60
✓ Mode opératoire	60
✓ Préparation des éprouvettes	61
II.5 Caractéristiques mécaniques des éprouvettes	62
III.5.1 Résistance à la traction par flexion	62
III.5.2 Résistance à compression	64

II.6 Conclusion	65
-----------------------	----

Chapitre IV : Interprétation des résultats

IV.1 Introduction	67
IV.2 Résultats des essais	67
IV.3 Conclusion :	74
Conclusion générale.....	76
Référence bibliographie	

Liste des tableaux

CHAPITRE I

Tableau I .1 : Analyse chimique de clinker [Barron ,1980]	8
Tableau I .2 : Le taux de clinker par type de ciment produit en Algérie. Note : « CRS »	14
Tableau I.3 : Structure de consommation de l'industrie Algérienne en électricité (Djohar Larege, B.2016) Sonelgaz.	15
Tableau. I. 4 : Taux de consommation de l'énergie électrique durant le temps (Djohar Larege, B. 2016) Sonelgaz.	16

CHAPITRE III

Tableau: III.1 : caractéristiques techniques du ciment EL mokawim	46
Tableau III.2 :Analyse granulométrique du GEULTA.....	51
Tableau III.3 : Masse volumique apparente du sable.....	54
Tableau III.4 : Masse volumique absolue du sable	55

CHAPITRE IV

Tableau IV.1 . Résistance de compression des mortiers (7jours).....	68
Tableau IV.2 : Résistance de traction par flexion a trois points du mortier (argile calciné) par flexion (7jours).....	68
Tableau IV.3 Résistance de traction par flexion du mortier avec argile calciné (14j)	70
Tableau IV.4 : Résistance de compression du mortier avec argile calciné (14j).....	70
Tableau IV.5 :Résistance de compression du mortier avec argile calciné (28j)	72
Tableau IV.6 :Résistance de compression de mortier avec argile calciné (28j).....	72

Liste des figures

Chapitre I

Figure I.1 : le mortier	03
Figure I.2 : La composition de mortier	04
Figure I.3 : le ciment	05
Figure I.4 : le principe méthode de fabrication le ciment.	05
Figure I.5 : le séchage et le broyage	06
Figure I .6 : Évolution des quantités de production des ciments avec le temps en Algérie (Belghit, A2022).	12
Figure I .7 : Production de ciment en Algérie par opérateur (Belghit, A. 2022).	13
Figure I .8 : Évolution de la consommation en Énergie Électrique en Algérie entre 2000-2014 (Djohar Larege, B. 2016) Sonelgaz	16
Figure I .9 : Les dix pays industriels responsables des forts dégagements en CO ₂ (Benhelal, E. 2021).	17
Figure I.10 : Dégagement de CO ₂ lors de la production du clinker (Benhelal, E. 2021)..	17
Figure I.11 : Évolution de dégagement de CO ₂ dans l'atmosphère avec le temps (Pedraza, J.2021).	18
Figure I .12 : Le domaine d'utiliser le mortier	25

Chapitre II

Figure II .1 : les différentes couleurs d'argile	28
Figure II .7 : Structure schématique de la kaolinite.....	29
Figure II .8 : Vue isométrique de la structure atomique de la kaolinite	29
Figure II .9 : Schéma de la structure de la montmorillonite.....	30
Figure II .10 : Schéma de la structure de la montmorillonite.....	31
Figure II -11 : Schéma de la structure de l'illite	32
Figure II .12 : Schéma de la structure générale d'une argile	33
Figure II .13 : Schéma de la structure de la Kaolinite	34
Figure II .14 : Schéma de la structure de la montmorillonite.....	37
Figure II .15 : Projection sur le plan (001) de la maille de la palygorskite D'après BRAUNER et PRESSINGER	41
Figure II .16 : La calcination d'argile.....	43
Figure II .17 : Température du four en fonction du temps.....	45

Liste des figures

Chapitre III

Figure III.1 : le sac de ciment El mokaouem Appareille de vicat.....	47
Figure III .2 : Appareille de vicat.....	48
Figure III .3 :Analyse granulométrique La granulométrie du sable corrigée.....	49
Figure III.4 :La granulométrie du sable corrigée.....	49
Figure III .5 :La courbe de l'analyse granulométrie la masse apparente	51
Figure III .6 :la masse apparente.....	52
Figure III .7 : La masse absolue	53
Figure III .8 : Equivalent de sable (au niveau de laboratoire LTPO Tiaret).....	55
Figure III .9 :Essai bleu de méthylène (au niveau de laboratoire LTPO Tiaret)	57
Figure III .10 : la tache de l'auréole.....	57
Figure III .11 : lacalcination d'argile	58
Figure III .12 : Le Diffractomètre (Laboratoire de synthèse et catalyse TIARET).....	58
Figure : III.13 : le diffractogramme de l'échantillon calciné et brute	59
Figure : III.14 : les matériaux et les matérielle utilisé.....	61
Figure III.15 : Agitateur d'éprouvettes (table à choc). (Labo de génie civil TIARET) ...	62
Figure III.16 : les éprouvettes avant et après le moulage (Labo de génie civil TIARET)	62
Figure III. 17 : Dispositif pour l'essai de résistance à la flexion.	63
Figure III.18 : machine de flexion	63
Figure III.19 : Schéma type de l'essai de compression	64
Figure III.20 : Essai de compression.....	64

Chapitre IV :

Figure IV.1 : Analyse des Résultats de l'Essai de Résistance de Traction par Flexion et de Compression à 7, 14 et 28 Jours	67
Figure IV.2 : Résistance de compression avec argile calcinée (7j).....	69
Figure IV.3 : Résistance de traction par flexion avec argile calcinée (7j).....	69
Figure IV.4 : Résistance de compression avec argile calcinée (14j).....	71
Figure IV. 5 : Résistance de traction par flexion avec argile calcinée (14j).....	71

Figure IV.6 : Résistance de compression avec argile calcinée (28j)	73
Figure IV.7 : Résistance de traction par flexion avec argile calcinée (28j).....	73

Notation

M_{vapp} :masse volumique apparente ,en kg

M :masse l'échantillon ,en kg

V_{vapp}: volume apparent de l'échantillon

E/C : Le rapport d'eau sur le liant

R_t : Résistance à la traction en (MPa)

F_t : Charge de rupture en (N).

R_C : Résistance à la compression en (MPa).

F_C : Charge de rupture en (N).

b : Côte de l'éprouvette est égale à 40mm

Introduction générale

Introduction générale

Le ciment est nécessaire à la fabrication du béton. Selon certaines études, la fabrication d'une tonne de ciment génère environ une tonne de CO₂ (la moitié vient de la calcination du CaCO₃ et l'autre moitié du combustible). Il est responsable d'environ 5 % des émissions de ce gaz sur la planète et l'industrie cimentaire est un grand consommateur d'énergie ce qui également devient un grand problème.

L'utilisation des argiles comme addition a pour objectif d'améliorer les performances physico-mécaniques des ciments à travers leur propriété pouzzolanique, physique et/ou chimique.

La pouzzolanité physique des argiles est liée à leur finesse qui est plus importante que celle de clinker, ce qui permet de réduire la porosité des mortiers et d'améliorer leur résistance et durabilité. Or, la pouzzolanité de ces matériaux ne peut se manifester qu'après un traitement approprié, dont le plus utilisé est le procédé thermique « calcination ».

L'utilisation de cette Addition peut participer à la réduction des quantités de CO₂ émises lors de la fabrication Clinker, comme elle peut réduire la consommation de ciment.

L'objet de ce travail : vise d'une part à fabriquer un matériau écologique et économique par la substitution de ciment par la poudre d'argile calcinée.

Toutes ces étapes et dérivées en quatre chapitres :

Le premier chapitre, présente une généralité sur les mortiers, définition, les types des mortiers, leurs emplois et leur classification.

Le deuxième chapitre, consacré sur la définition de l'argile, leur classification, la calcination, réaction pouzzolanique, et la valorisation de l'argile calcinée dans les matrices cimentaires.

Le troisième chapitre, il présente le programme expérimental, incluant les essais effectués pour voir l'effet de l'argile sur le comportement du mortier, les caractéristiques des matériaux utilisés ainsi les procédures de confection des mélanges.

Le quatrième chapitre, pour analyser les résultats de travail expérimental réalisé dans la partie précédente (chapitre 3).

Ce travail se termine par une conclusion générale et des perspectives.

Chapitre I

Généralités sur le mortier

I.1 Introduction

Le mortier est un matériau composite ,obtenu par mélange homogène d'une matière inerte (sable) avec une matière active (liant), le tout gâché avec certaine quantité d'eau .le mortier pouvant satisfaire à une variété d'exigences dans le domaine de la construction .Toutefois ,il n'existe pas de mortier universel ,convenant à toutes les situations .Le Concepteur ne pourra choisir le mélange convenant le mieux pour un projet donné que s'il a une bonne connaissance des matériaux qui entrent dans la composition du mortier et de leur propriétés .



Figure I.1 : Le mortier

I.2 Définition de mortier

Le mortier est un mélange de sable à la granulométrie plutôt fine et d'un liant comme le ciment. Le mélange obtenu après l'adjonction d'eau, a la consistance d'une pâte ou d'une crème. Il est utilisé par les maçons comme élément de liaison, de scellement ou comme enduit. Le rocailleur utilise principalement des mortiers composés de ciment Portland et de sables à granulométries variables pour réaliser ses ouvrages [1].

I .3 Les compositions de mortier

Le mortier c'est un mélange constitué le plus souvent de ciment ou de chaux, de sable, d'adjuvants éventuels et d'eau de gâchage.

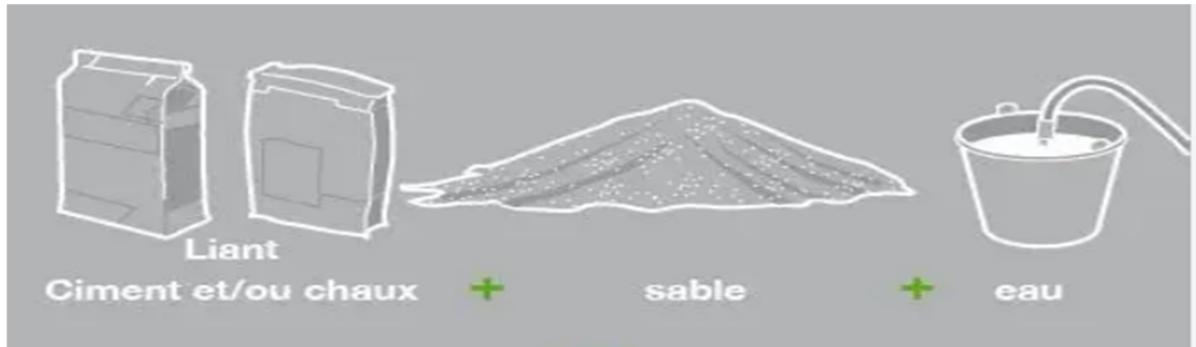


Figure I .2: La composition de mortier

I .3.1 Le Ciment

I .3.1.1 Historique de ciment

Le ciment est un liant hydraulique et le constituant de base des bétons et matières à la manière d'une « colle », il permet d'agglomérer entre les grains de sable et les granulats .

Etymologiquement le mot ciment vient du latin caementum, originellement « pierre naturelle, non taillée ». Le ciment est un produit très connu dans la civilisation contemporaine, mais il est mal connu du grand public.

Sa fabrication est une processus technologie. Le mélange de calcaire, d'argile, de sable et d'eau dans les constructions est ancien : les Egyptien l'utilisant déjà.

En 1817, le jeune ingénieur Louis Vicat mène des travaux autour des phénomènes d'hydraulicité du mélange « chaux - cendres volcaniques ».

Louis Vicat est le premier à déterminer de manière précise, artificielle et contrôlée les proportions de calcaires et de silices nécessaires à l'obtention du mélange qui après cuisson à une température donnée et après broyage donne naissance à un liant hydraulique industrialisable (le ciment). Mais il publie le résultat de ses recherches sans déposer de brevet.

L'Ecossais Joseph Asdin affine la composition du ciment mis au point par Louis Vicat et dépose en 1824 le brevet d'un ciment en prise lente il le baptise « Portland » en raison de sa ressemblance avec une roche de la région de Portland dans le sud de l'Angleterre [3].

I .3.1.2 Définition

Le ciment Portland est un ciment hydraulique qui contribue à la durabilité, à une haute résistance contribue à la durabilité, à une haute résistance initiale et à une grande résistance en compression.

Il s’agit d’un des principaux ingrédients cimentaires des mortiers. Seulement trois des huit types couverts par la norme ASTM C150, « Standard Specifications for Portland Cement » sont recommandés par la Brick Industry Association (BIA)[4].



figure.I.3 : le ciment

I .3.1.3 fabrications du ciment

La fabrication des ciments nécessite un savoir –faire, pour la des outils et des techniques de production vu la complexité de leur utilisation, ce pendant elle peut se résumer



Figure I .4 : les principes méthodes du fabrication de ciment

I .3.1.3.1 Extraction et préparation des matières premières

Les matières premières sont généralement extraites en présence d'artificiers par havage à l'explosif des parois rochers d'une carrière.

Ces matières sont conduites à un atelier de concassage afin d'être triées et broyées finement les (24 a40mm). Les blocs sont ensuite acheminés par une bande transporteuse vers le hall de pré-homogénéisation où la matière est disposée en couches horizontales superposées puis reprise verticalement.

La matière première peut varier d'une cimenterie à une autre, en fonction de la qualité de gisement exploité, la composition du cru reste dans des proportions bien définies :

Carbonate de calcium (CaCO_3) de 77 à 83%

Silice (SiO_2) ; de 13 à 14%

Alumine (Al_2O_3) : de 2 à 4%

Oxyde ferrique (Fe_2O_3) de 1,5 à 3% [5]

I .3.1.3.2 Le séchage et le broyage

Pour obtenir une matière première dosée idéalement , le cru doit être séché et broyé très finement , puis très soigneusement échantillonné à fin d'avoir toujours exactement la même composition et cela pour produire des ciments ayant des quantités constantes



Figure I .5: le séchage et le broyage

I .3.1.3.3 Obtention de clinker

Le cru est cuit dans un four rotatif où les flammes atteignent 2000°C, portant ainsi la matière à environ 1450 °C. Il existe trois méthodes de cuisson, de la plus ancienne à la plus récente [5].

I .3.1.3.4 La voie humide :

Le cru est transformé en pâte liquide avant la cuisson. Cela implique une grande consommation d'énergies et d'eau. Cette méthode a été abandonnée progressivement dans les années 1970-1980 [5].

I .3.1.3.5 La voie semi-humide :

Le cru est probablement transformé en granules de 10 à 20mm avant d'être préchauffé et cuit [5].

I .3.1.3.6 La voie sèche :

Le cru est préchauffé directement sous forme pulvérulente, puis cuit. Cette dernière méthode est maintenant la plus courante.

À la sortie du four, le clinker est brusquement refroidi par un refroidisseur à grille permettant de le ramener à une température d'environ 100°C [5].

I .3.1.3.7 Obtention du ciment

Le clinker doit être finement broyé dans des broyeurs à boulets, c'est également lors de cette étape que l'on ajoute au clinker du gypse qui est indispensable à la régulation de prise du ciment (3 à 5%)

D'autres constituants secondaires peuvent être ajoutés afin de créer différents types de ciments tels que : le latier granulé de haut fourneau, cendres volantes, pouzzolanes, tuffe, etc.

Conditionnement en sac ou en vrac.

Après sa fabrication, le ciment est sous sa forme définitive, il est acheminé vers des silos de stockage puis expédié vers les lieux de consommation [5].

I .3.4 Composition du ciment

I .3.4.1 la Composition chimique du ciment

L'analyse chimique du clinker pour un ciment portland révélé le teneur massique moyennes Des principaux oxydes, donnés dans le tableau :(I .2.1)

Tableau I .1 : Analyse chimique de clinker [Barron ,1980]

Eléments	SiO ₂	AL 2O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O
Pourcentage%	18-24	4-8	62-68	2-5	0-5	0-5	0-2	0-2
Moyenne%	21,9	6,3	66.6	2,5	1.0	0 .8	0.2	0 .2

En chimie des ciments, et afin d'abrégé les notations, les composés primaires du ciment sont représentés comme suit :

C=CaO, S=SiO₂, A=AL₂O₃, F=Fe₂O₃, M=MgO, S=SO₃, H=H₂O, N=Na₂O, k=K₂O, C=CO₂

La combinaison de ces oxydes nous donne les phases minérales majeurs du clinker, les Cristaux, formés ne sont pas purs [6].

I .3.4.2 La composition minéralogique

Les ciments sont issus du broyage des granules de clinker et de gypse, et éventuellement un Ou deux constituant secondaires. Les composés minéralogiques principaux du ciment dépendent de ceux du clinker à partir duquel il a été fabriqué. [Pliksin 1993] [6].

I .3.4.2.1 Les phases majeures

Elles sont principalement constituées de phases alite, bélite et célite) [6].

a)Le silicate tricalcique (alite) (3CaOSiO₂) : C'est une forme impure de C₃S Qui constitue une des phases principales du ciment (50à70%) [Balbaki,1998], c'est principalement la phase qui confère la résistance au ciment, plus particulièrement à court terme. elle contient jusqu'à 4% D'oxydes étrangers [Alexander ,1998 ; [Pliskin ,1993 ; Baalbaki ,1998,Barroghel-Bouny,1994].

Les élément les plus fréquents sont : Al³⁺, Mg²⁺, Fe³⁺, s²⁻ et k⁺ [Petrov ,1998

Sous le microscope, l'alite se présente sous forme de cristaux polygonaux de 20 à 50µm de diamètre [Ghosh,1983] [6].

b) le silicate bicalcique (bélite) (2CaOSiO₂) : forme impure de C₂S qui constitue entre 15 à 30% du ciment portland. On retrouve au moins quatre variétés polymorphiques de

C_2S , la plus courante étant la forme C_2S , qui lors d'un refroidissement lent, peut se transformer en γC_2S et qui ne présente aucune propriété hydraulique, [Baalbaki, 1998] il apparaît généralement sous forme de cristaux arrondis, tout comme le silicate tricalcique, et peut contenir jusqu'à 6% d'oxydes mineurs [Ghosh, 1983]. Ainsi les ions les plus fréquents qui entrent dans la structure du C_2S sont : Al_3^+ , Fe_3^+ , P_5^+ , K^+ et SO_4^{2-} [Petrov, 2003] [6].

c) l'aluminate tricalcique (célite) : c'est le mélange de deux phases, le C_3A et le C_4AF (5 à 10% Du ciment), au cours de la clinkérisation, la célite est à l'état liquide. Après refroidissement, elle cristallise entre les cristaux de C_3S et C_2S et forme une phase interstitielle [baalbaki, 1998 Baroghel-Bouny, 1994] [6].

d) l'aluminate tricalcique (C_3A) : l'aluminate tricalcique possède la vitesse de réaction la plus importante [Alexander, 1988 ; Baalbaki, 1998] et sa forme détermine sa réactivité. la présence d'alcalis (surtout le sodium) modifie la symétrie cristalline du C_3A , selon la quantité totale dissoute dans le réseau cristallin, le C_3A peut donc être monoclinique (peu fréquent) ou cubique orthorhombique.

Le C_3A orthorhombique stabilisé par la présence de sodium est moins réactif que le C_3A cubique [Baalbaki, 1998] [6].

E) Le Ferroaluminate tétracalcique ($4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3$) : C'est une solution solide composée par des cristaux massifs et allongés, pouvant contenir jusqu'à 13% d'impuretés Tel que Mg_2^+ , Si_4^+ et des alcalis [Petrov, 2003]. Les formes C_6A_2F et C_4AF sont les plus courantes dans Le ciment [Amar, 2001].

Le C_4AF s'hydrate moins rapidement et dégage moins de chaleur que le C_3A , il joue un rôle peu important dans la réaction de durcissement, et confère au ciment sa couleur grise caractéristique [Pliskin, 1993], due à la présence de fer (Fe) [6].

I .3.1.4.2.2 Les constituants mineurs : sont constitués de chaux libre, et des oxydes.

a) La chaux libre (CaO) : Elle est cristallisée dans le système cubique, sa densité est de 3,18. Sa présence dans le ciment est inférieure à 2% [Dreux, 1995], en raison de problèmes posés Par son hydratation (gonflement chimique causé par son extinction, connu sous le nom ' Foisonnement de la chaux'), ce qui conduit à des désordres en cas d'hydratation tardive dans le béton durci [6].

b) L'oxyde de magnésium (MgO) : Il est aussi appelé périclase. Lorsqu'il est non combiné, il peut être à l'origine d'une expansion par réaction avec l'eau. Sa teneur dans le

clinker doit être Inférieure à 5% [Pliskin, 1993]. Il réagit de la même manière que le CaO en formant le $Mg(OH)_2$ avec un fort accroissement de volume [6].

c) Les oxydes alcalins (Na_2O et K_2O) : Leur teneur est inférieure à 1%, mais ils jouent un rôle important lors de la clinkérisation, en favorisant notamment la formation de C_3S [6] .

E) Les ciments normalisés : Selon la norme européenne [NF EN 197-1] on distingue plusieurs types de ciment, classés d'une Part en fonction de l'absence ou de la présence de constituant secondaire, et d'autre part, suivant La nature et les proportions comme suit :

- CEM I : ciment Portland avec 95 % de clinker.
- CEM II : ciment Portland composé de 65 à 94% de clinker.
- CEM III : ciment de haut fourneau de 5 à 64% clinker.
- CEM IV : ciment pouzzolanique de 45 à 89% clinker.
- CEM V : ciment composé de 20 à 64% clinker.

Les divers types de ciment comportent des types et sous-types qui sont différenciés en Fonction de leur teneur en clinker et leur classe de résistance. Les lettres A, B et C en fonction de la Teneur en clinker. Le nombre 32.5, 42.5 ou 52 ,5 indique leur classe de résistance (valeur minimale spécifiée de la résistance à la Compression mesurée à 28 jours et donnée en N/mm^2 ou MPa). Les lettres R pour les ciments à prise rapide et N pour une prise normale.

I .3.1.5 Hydratation du ciment

Le mélange du ciment avec de l'eau provoque la dissolution des anhydres du ciment jusqu'à la sursaturation des hydrates qui, moins solubles que les anhydres, précipitent. La pâte obtenue est appelée pâte de ciment durcie. Ce processus est bien le résultat d'un ensemble de réactions chimiques.

I .3.1.5.1 Hydratation des silicates de calcium, C_3S , et C_2S

En solution, le C_3S se dissout libérant des ions calcium et hydroxyde ainsi que du silicium. Une fois la limite de solubilité des C-S-H atteinte, ces derniers précipitent avec en moyenne un rapport calcium sur silicium (C/S) de 1,7 pour un ciment de Portland (Taylor 1997). Cette réaction, limitée par le silicium, ne consomme pas tous les ions calcium en solution. Une fois la limite de solubilité de l'hydroxyde de calcium atteinte, ce dernier précipite sous la forme de portlandite.

L'ensemble de ces réactions peut être résumé par l'équation bilan suivante (Eq 1-1).



Suivant le même processus, la dissolution du C₂S conduit également à la précipitation de C-S-H et de portlandite [7].

Apportant moins de calcium en solution, la précipitation de portlandite est plus faible en comparaison avec la même quantité de départ de C₃S. L'équation bilan Eq 1-2 résume ce processus.



Ces réactions sont exothermiques et catalysent la suite de l'hydratation du ciment [7].

I .3.1.5.2 Hydratation des aluminates de calcium C₃A ET C₄AF

Le C₃A est l'anhydre du clinker le plus réactif. L'ajout de sulfate de calcium, généralement du gypse (sulfate de calcium dihydraté),

au clinker favorise la précipitation de sulfoaluminates hydratés dont la limite de solubilités est plus basse que celles des phases aluminates de calcium hydratés. La phase la moins soluble est ainsi le trisulfoaluminate de calcium aussi appelé ettringite. L'équation bilan Eq 1-3 résume ce processus.



Les ions aluminates non consommés par cette réaction interviennent dans la précipitation des aluminates de calcium hydratés et, en présence de carbonates, du monocarboaluminate de calcium. Si les aluminates de calcium anhydres sont en excès par rapport au gypse, les ions sulfate font défaut. L'ettringite formée se dissout au profit du monosulfoaluminate de calcium selon l'équation bilan Eq1-4.



Le gypse agit comme un régulateur de prise. Il semble que les aiguilles d'ettringite se forment autour des grains d'anhydre et ralentissent son hydratation.

Une faible proportion de C₃A améliore la résistance du matériau cimentaire à l'attaque sulfatique, en limitant le stock d'aluminium, élément nécessaire à la précipitation d'ettringite (Taylor 1997).

Les vitesses de réaction des réactions décrites ci-dessus sont différentes, de la plus rapide à la plus lente : dissolution du C₃A, du C₃S, du C₂S puis du C₄AF (Escalante-García & Sharp 1998)[7] .

I.3.1.6 Secteur de production des ciments en Algérie

I.3.1.6.1 Historique de fabrication des ciments en Algérie

Le secteur de production des ciments en Algérie est passé par plusieurs étapes depuis l'indépendance du pays en 1962 à savoir :

Avant 1962 où il y avait que trois cimenteries qui ont été en production par la voie humide Rivet Lafarge, Pointe Pescade Lafarge et Saint-Lucien Cado d'une capacité totale de production d'Un million cinq cents Tonnes de ciment.

Après l'indépendance du pays où le secteur a connu la nationalisation de ces cimenteries sous le nom Société Nationale des Matériaux de Construction (SNMC).

Entre 1967 à 1983 la SNMC a développé les lignes héritées par l'installation de 12 nouvelles lignes de production par la voie sèche ce qui a augmenté la capacité de production à 10 Millions Tonnes/An.

Entre 1983 à 2005 le secteur a connu le lancement de trois nouvelles lignes de production à Ain Touta (Batna), El Elma Labiod (Tébessa) portant la capacité de production à 11.5 millions tonnes /An, Ensuite le nouveau projet privé à El Msila au compte du groupe Orascom [8].

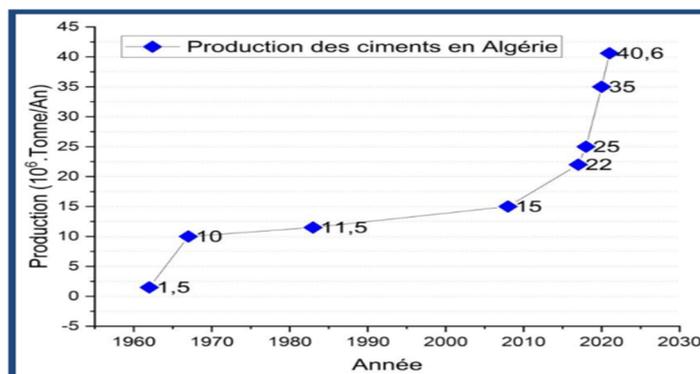


Figure I .6 : Évolution des quantités de production des ciments avec le temps en Algérie (Belghit, A2022).

En 2006 deux nouveaux projets ont été prévus à savoir celui du Sig (Orascom) avec une capacité de 2 Millions Tonnes/An et celui de Djelfa (Asec-Égypte) avec 1.5 Millions Tonnes produites par An dont la capacité de production du pays est passée à 15 millions Tonnes par An (Figure I .6).

Après 2008, le rythme de développement du secteur s'est accéléré en matière de nouvelles implantations (OUADA, Y. 2011).

En 2018 le nombre des cimenteries s'est multiplié à 17 avec une augmentation de production annuelle ramenant la quantité entre 25 à 30 millions Tonnes/An (APS 23/10/2018).

Aujourd'hui, l'Algérie dispose de 20 cimenteries installées à plusieurs endroits du pays avec une production totale de 40 millions Tonnes depuis 2020 (APS. 2022)

Actuellement seul le groupe Industriel des ciments d'Algérie « GICA » dispose de 14 cimenteries (Site officiel de l'entreprise) avec une production annuelle de 20 Millions Tonnes (Figure I .7).

Le deuxième producteur des ciments « Lafarge Holcim » avec une production annuelle de 11.1 Millions Tonnes (Figure I .8). Et le reste des opérateurs privés avec une production de 9.5 Millions Tonnes par An (A.P.S. 2020). Ce qui rend la production nationale des ciments en Algérie de à 40.6 Millions. Tonnes par An (Figure I .7)[8] .

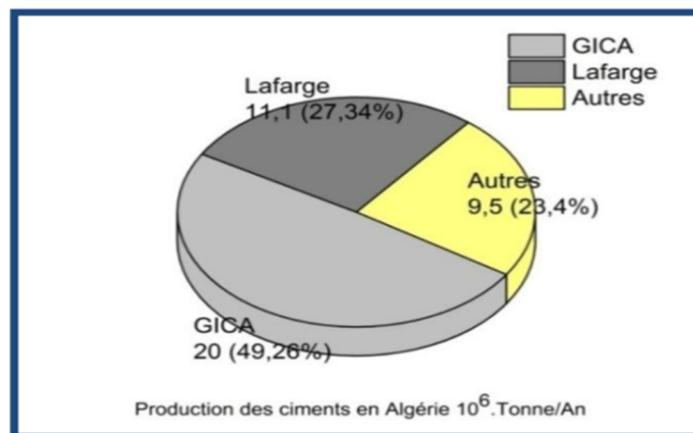


Figure I .7 : - Production de ciment en Algérie par opérateur (Belghit, A. 2022).

Les qualités des ciments produites par les cimenteries en Algérie sont multiples. Les types de ciments produits par la société « GICA » (Site officiel de l'entreprise) sont:

Le ciment CEMI 52.5.

Le ciment CEMII 32.5.

Le ciment CEMII 42.5N.

Le ciment CEMII 42.5 R.

Le ciment CEMII 42.5 SR 5.

Le ciment CEMII 42.5 SR3.

Et les types de ciments produits par « Lafarge Holcim » (Site officiel de l'entreprise) sont:

Le ciment « Chamil » : CEMII B-L 32.5.

Le ciment « Matine » : CEMII A-L 42.5.

Le ciment « Sarie » : CEMII A-L 52.5.

Le ciment « Moukaouim » : CEMI 42.5 N-SR 3.

Note : Les informations sur les produits du secteur privé ne sont pas disponibles.

Comme montrés dans le Tableau I .2 ;, tous les ciments locaux (sus cités) sont produits principalement à base de clinker avec des taux élevés, spécialement les ciments résistant aux sulfates avec un taux de clinker supérieur à 95% [8].

Tableau I .2 : Le taux de clinker par type de ciment produit en Algérie. Note : « CRS »

Produits	Taux de clinker(%)
Le ciment CEM I 52,5 (CRS)	95-100
Le ciment CEMII 32.5.	65-94
Le ciment CEMII 42.5N	65-94
Le ciment CEMII 42.5 R.	65-94
Le ciment CEMII 42.5 SR 5 (CRS)	65-94
Le ciment CEMII 42.5 SR3 (CRS).	65-94
Le ciment « Chamil » : CEMII B-L 32.5	65-79
Le ciment « Matine » : CEMII A-L 42.5	80-94
Le ciment « Sarie » : CEMII A-L 52.5.	80-94
Le ciment « Moukaouim » : CEMI 42.5 N-SR 3 (CRS)	95-100

Note : « CRS » représente une abréviation du ciment résistant aux sulfates.

I.3.1.7.2 Consommation de l'énergie électrique de l'industrie de production des ciments

La consommation énergétique d'industrie de fabrication des ciments représente le quart de la quantité globale de l'industrie en Algérie (Tableau 1.3) dont cette consommation induite par la production des ciments a été multipliée à 37.6 fois entre 1970 à 2015 (Figure 1.4) (Djohar large, B. 2016) [8].

Tableau I.3 Structure de consommation de l'industrie Algérienne en électricité (Djohar Larege, B.2016) Sonelgaz

Année Secteur	1980	2000	2014
Eau, Energie (%)	2,29	2,46	19,03
Hydrocarbures(%)	29,78	46,71	34,49
Mines et carrières(%)	3,41	1,03	0,41
Industries sidérurgique, métalliques, mécaniques et électriques (%)	28,77	21,56	23,31
Matériau de construction (%)	1,7	0,52	0,10
Industries textiles (%)	3,78	1,09	0,36
Bois, Papier, et liège (%)	5,97	4,15	6,60
Industries Agro- alimentaires(%)	0	0	0,85
Hotels, restaurants et cafés (%)	0	0	0,20
Transport et PTT (%)	0,85	0,83	1,22
ToTale (%)	100	100	100

Pour la période entre 2000 et 2014, l'industrie des ciments a doublé de consommation en énergie électrique et multipliée la production par 2.42 pour la même période (Djohar Larege, B. 2016) [8]

Tableau. I. 4- Taux de consommation de l'énergie électrique durant le temps (Djohar Larege, B. 2016) Sonelgaz.

Temps \ Année	2000(%)	2014(%)
Heures de pointe	15,16	16,25
Heures pleines	52,86	51,35
Heures creuses	31,98	32,45
Totale	100	100

Pour la Bonne gestion d'énormes dépenses énergétiques des cimenteries, ces dernières ont renforcé leurs rythmes de production pendant les horaires creux et diminuent leurs productions durant les horaires de pointe (Tableau 1.3)[8].

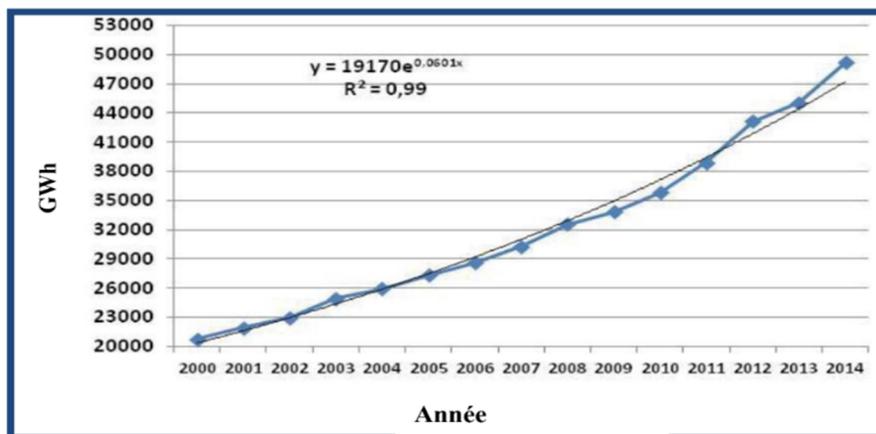


Figure I .8- Évolution de la consommation en Énergie Électrique en Algérie entre 2000-2014 (Djohar Larege, B. 2016) Sonelgaz .

I.3.1.7.3 Dégagements de dioxyde de carbone par les cimenteries

Les dégagements industriels énormes de dioxyde de carbone (CO₂) dans l'atmosphère provoquent une augmentation la concentration atmosphérique des gaz à l'effet de serre causant le réchauffement climatique (Benhelal, E. 2021).

Dix pays industriels sont responsables de 70% des dégagements de CO₂ dans l'atmosphère (Figure 1.10).

Après les centrales électriques classées comme la première source émettrice de dioxyde de carbone (25% d'émissions mondiales). Ensuite l'industrie de fer et de l'acier responsable de 7.2 %. L'industrie du ciment est en troisième classement responsable de 5% des dégagements en CO₂ dans l'atmosphère (Benhelal, E. 2021) [8].

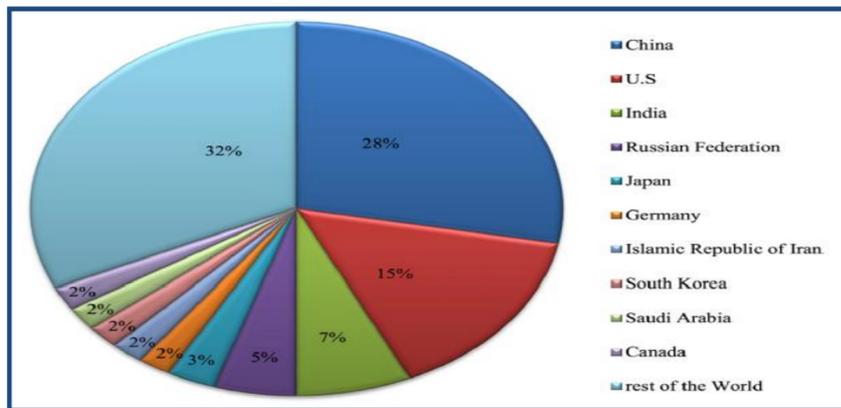


Figure I .9 : Les dix pays industriels responsables des forts dégagements en CO₂ (Benhelal, E. 2021).

Le clinker est un produit de cuisson d'un mélange minéral contenant majoritairement de calcaire et taux considérable d'argile (autour de 20%) avec une température avoisinant les 1450°C dans des fours rotatifs spécialisés, ensuite broyé dans des broyeurs jusqu'à atteindre la finesse voulue [8].

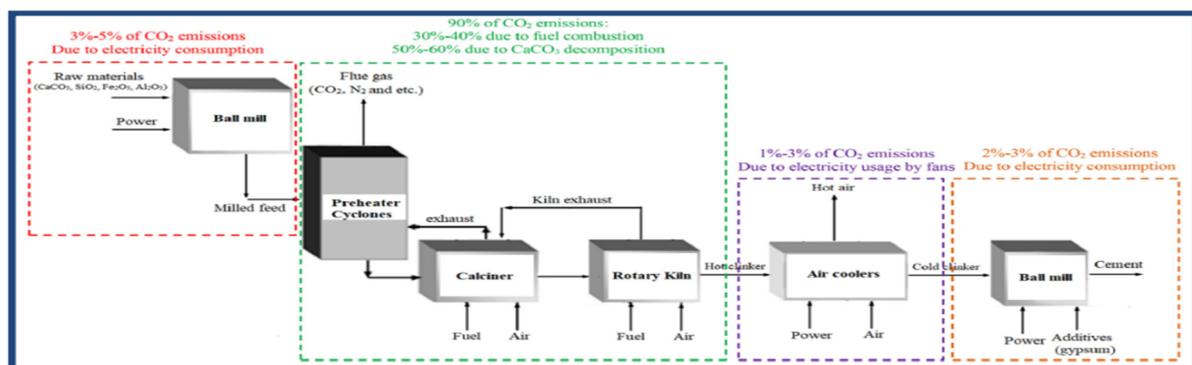


Figure I.10: Dégagement de CO₂ lors de la production du clinker (Benhelal, E.2021).

En tant que pays qui compte investir dans la production des ciments et augmenter la cadence dans l'avenir, l'Algérie doit prendre en considération ces problèmes sachant qu'actuellement les cimenteries Algériennes ne dépassent pas 22 Millions Tonnes de dioxyde de carbone (CO₂) annuellement dont ces quantités ne dépassent pas le 1% des dégagements mondiaux [8].

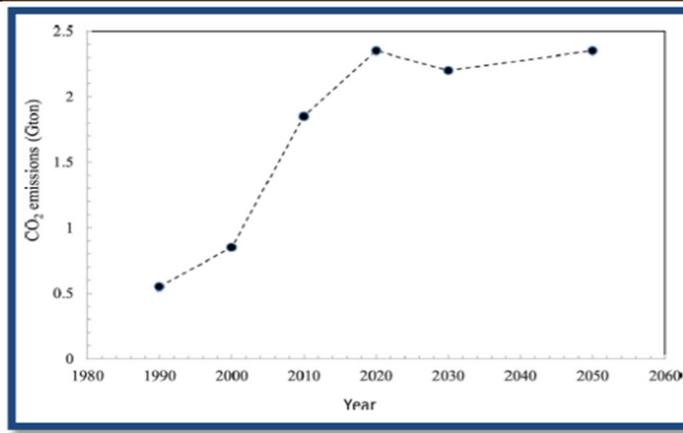


Figure I.11: Évolution de dégageant de CO₂ dans l'atmosphère avec le temps (Pedraza, J.2021)

I.3.1.7. 4 La réduction du taux de clinker dans le ciment

Pour réduire les dégagements de CO₂ et diminuer l'énergie de production néfaste pour l'environnement, plusieurs matériaux ont été proposés pour substitution partielle du ciment afin de jouer un rôle pouzzolanique.

Parmi les matériaux proposés pour la substitution partielle du ciment la vase calcinée des arrages qui est un déchet naturel renouvelable périodiquement et qui a prouvé son rôle dans plusieurs recherches dans ce domaine de remplacement du clinker avec des taux allant jusqu'à 30% dans le ciment.

Les matériaux utilisés actuellement par les cimenteries Algériennes pour la constitution principale du ciment avec le clinker sont : la pouzzolane naturelle, le calcaire, le laitier des minerais de fer et la fumée de silice mais avec des quantités limitées. Cependant avec l'augmentation de production des ciments prévue, les responsables sont obligés de réfléchir pour engager des nouveaux matériaux dans ce domaine d'utilisation afin de préserver les ressources naturelles du pays et lutter contre l'épuisement des ressources non renouvelable [8].

I .3.1.8 L'impact de ciment sur l'environnement

La fabrication du ciment, nécessite une grande quantité d'énergie et provoque un dégagement significatif de CO₂ dans l'atmosphère, il a été prouvé que l'industrie de ciment est responsable de 5 à 7% des émissions de gaz à effet de serre [10].

I .3.1.8.1 La source de CO₂ dans l'industrie cimentière

En cimenterie, plusieurs sources d'émissions de CO₂ (dioxyde de carbone) sont identifiables, toutes liées au processus de fabrication du ciment (Febelcem, « Contribution de l'industrie du ciment à la réduction des émissions de CO₂ », 2007) [10].

L'utilisation des combustibles fossiles et de substitution : C'est ce que l'on appelle le CO₂ énergétique direct qui présente 37% d'émissions de CO₂ dans le secteur du ciment.

L'utilisation de l'électricité, principalement dans les installations de broyage, c'est le CO₂ énergétique indirecte qui présente 6% d'émissions du CO₂.

Le processus chimique : Dans le four à clinker, le calcaire est soumis à des températures très élevées, et subit une réaction chimique appelée calcination ainsi le calcaire se décompose en chaux, et en CO₂, appelé CO₂ de procédé, il présente 57% d'émission de CO₂ du secteur cimentier [10].

I .3.1.8.2 Réduction des gaz à effet de serre dans l'industrie du ciment

La réduction des émissions de gaz à effet de serre, est due principalement à la réduction d'émission de CO₂, qui est aujourd'hui un enjeu planétaire souligné par les accords Kyoto. Face à ce constat, depuis de nombreuses années, l'industrie cimentière a mis en place des mesures pour réduire ses émissions. En particulier les actions suivantes [11] :

Incorporer des matériaux sélectionnés déjà décarbonatés, exemple de calcaire dans les matières premières.

Incorporer des additions minérales (cendre volantes, métakaolin, laitiers de hauts fourneaux, ...) dans les ciments, réduit la quantité du clinker. Ce qui permet de réduire également les émissions de CO₂ énergétique direct.

L'industrie du ciment, a mis en œuvre plusieurs voies qui permettent de réduire les Émissions de CO₂. D'où dans ce travail on s'intéresse au procédé qui permet de remplacer une Part du ciment par l'incorporation des additions minérales, qui sont des rejets [11].

I .3.1.8.3 Protection de l'environnement

L'industrie cimentière participe depuis plusieurs années à l'effort collectif qui doit être sans cesse fourni pour améliorer la gestion du patrimoine naturel par [9] .

✓ **Valorisation énergétique** : les cimentiers sont des énergivores. Heureusement que Le processus de fabrication des ciments permet d'utiliser des combustibles de substitution en les remplaçant par des combustibles fossiles (charbon, fioul lourd,...). C'est ce qu'on appelle la valorisation énergétique.

✓ **Valorisation matière** : La valorisation matière est un processus qui permet de tirer avantage en cimenterie, des déchets issus d'autres industries. Dans les cimenteries

Cette substitution est particulièrement importante et intervient à trois niveaux :

- Au niveau de la fabrication du clinker.
- Au niveau de la mouture.
- Au niveau des ajouts. .

✓ **Protection des eaux**

Les cimentiers ont pris des dispositions pour limiter cet impact en mettant en place des systèmes de gestion responsables de l'eau dans les carrières. .

✓ **La réhabilitation des carrières**

Les permis d'extraction ou permis unique, nécessaire à toute exploitation, prévoient des obligations de remise en état des sites exploités. Les cimentiers les respectent et les appliquent.

I .3.1.8.4 Réduction de la consommation énergétique et l'émission de CO₂

La fabrication de ciment en Algérie est responsable d'importante émission de CO₂ et D'une forte consommation d'énergie. La nature des énergies consommées (gaz naturel) bien qu'elle soit moins polluante mais elle augmente le cout global de la production.

La réponse à la problématique énergétique se traduit par les actions suivantes (Belge du ciment, FEBELCEM,2006)[9].

Trouver des sources d'énergie alternatives aux énergies fossiles.

Rationaliser l'utilisation de l'énergie par :

- Un respect strict de la réglementation.
- Une volonté gouvernementale par la réponse au Plan Énergie Climat à L'horizon 2020.

. + 20% d'efficacité énergétique.

. + 20% des énergies renouvelables dans le mix énergétique.

. 20% d'émission de gaz à effet de serre [9].

I .3.1.8.4 Domaines d'utilisation du ciment

Le ciment est utilisé dans la fabrication d'éléments structurels utilisés dans la construction, dont les plus importants sont [14] Ahmidi. S, « Modélisation de l'efficacité des additions minérales entre les propriétés mécanique et de durabilité par le concept du liant équivalent ».

- ✓ Il est utilisé dans la préparation des fondations des bâtiments, des installations diverses et des allées piétonnières.
- ✓ Il est utilisé dans la fabrication de divers types de carreaux, notamment les carreaux de mosaïque.
- ✓ Il est utilisé dans le béton pour construire des appuis, des escaliers, des colonnes, des poutres et des toits.
- ✓ Il est utilisé dans la construction de réservoirs d'eau et de puits.
- ✓ Il est utilisé pour préparer les raccordements des tuyaux et des drains.
- ✓ Il est utilisé dans les travaux de plâtrerie et de revêtement mural.
- ✓ Il est utilisé dans la construction de poteaux d'éclairage et de tours de communication [21].

I .3.2 Le Sable

Le choix de la granulométrie du sable est en fonction des travaux à réaliser, pour des travaux de maçonnerie, on emploie souvent des sables 0/5 mm ; Cependant pour des travaux de briquetage ou d'enduits, le sable est plus fin 0,5 et 2 mm Le rôle du sable dans un mortier est de:

- diviser la masse du liant pour permettre la prise (liant aérien).
- abaisser le prix de revient du mortier.
- diminuer le retrait et ses conséquences (les fissurations) du fait que le sable est incompressible que le retrait se trouve amoindri [2].

I .3.3 L'eau

Le choix de l'eau de gâchage a aussi une grande importance car elle remplit un double rôle : elle sert à hydrater le ciment et ce qui est plus important, elle contribue à son ouvrabilité.

Les mortiers devraient contenir la quantité d'eau maximale compatible avec une ouvrabilité optimale. L'eau devrait être propre et ne pas contenir de produits nocifs tels que des acides, des alcalis ou des matières organiques. Lorsqu'elle est potable, on peut l'utiliser [2].

I .3.4 La chaux :

Qui est le composant traditionnel du mortier, possède une ténacité et un pouvoir de rétention d'eau excellent, mais sa résistance mécanique est faible et un pouvoir de rétention d'eau excellent, mais sa résistance mécanique est faible et sa cure est lente. La cure des mortiers de chaux s'effectue lentement par carbonatation sous l'effet du gaz carbonique de l'air ; ce processus peut être fortement ralenti par temps froid et humide [2].

I .4 Les types de mortier**a) Mortier ciment**

Il s'agit du mortier le plus conventionnel, celui que vous allez très probablement rencontrer couramment lors de vos achats. Le mortier de ciment est constitué d'un mélange très classique de ciment, sable et eau. Il est utilisé pour bâtir des murs, lier des pierres et des briques entre elles... On le retrouve en fait dans tous les travaux où un produit spécifique n'est pas nécessaire. Mortier résistant, il sèche rapidement et donne de la rugosité tout en corrigeant les défauts des surfaces. Autrement dit, c'est un mortier élémentaire, robuste et fiable [14].

B) Mortier de chaux

Traditionnellement, le mortier de chaux est le mortier le plus utilisé dans les anciennes constructions. Obtenu à partir d'un mélange de sable et de chaux, il est encore utilisé aujourd'hui pour ses propriétés intéressantes. Il permet aux murs et matériaux de construction naturels de respirer. Il dispose de capacités hydrofuges idéales pour les pièces d'eau et se révèle plus flexible et onctueux. Enfin, son application est plus facile puisque le temps de séchage est bien plus long, ce qui explique la popularité des enduits à la chaux. En revanche, il est moins résistant que le ciment et plus difficile à doser.

On le divise généralement en deux catégories :

- la chaux hydraulique qui se solidifie au contact de l'eau puis de l'air.
- la chaux aérienne qui durcit uniquement au contact de l'air et plus lentement[14].

C) Mortier bâtard

Cette appellation désigne un mortier très spécifique fabriqué avec un mélange chaux et ciment. Le mortier bâtard est un mortier intermédiaire entre ces deux catégories. L'ajout de chaux à un mortier ciment apporte de la plasticité (réduction du risque de fissuration), rend le mélange plus souple et le tout est plus facile à manipuler. Le ciment confère la résistance et améliore la vitesse de durcissement du mortier de chaux.

Il convient cependant de noter qu'il nécessite d'avantage de temps pour sécher qu'un mortier -ciment, ce qui peut se révéler être autant un défaut qu'un avantage [14].

Notons enfin une distinction importante entre deux termes que vous êtes susceptibles de rencontrer concernant la texture des mortiers de façon générale :

Les mortiers gras sont plus denses et contiennent plus de liant, ce qui les rend quasiment imperméables.

Les mortiers maigres eux sont plus chargés en sable qu'en ciment et sont légèrement perméables, mais ils sont moins résistants.

Maintenant que vous êtes familier avec les mortiers essentiels et les distinctions basées sur leurs matériaux primaires, nous vous proposons des distinctions basées sur la fonction et l'utilité des mortiers. [14].

D) Mortier colle

Le mortier colle est un mortier adhésif qui permet de coller un revêtement contre un mur ou un sol. Il est produit avec du ciment et des polymères particuliers qui lui confèrent ses propriétés d'adhérence. On peut donc l'employer pour coller du carrelage (mur et sol), des dalles ou encore des parements. Il faut cependant faire attention à celui qu'on sélectionne et à l'usage que l'on souhaite en faire. Certains sont plus adaptés pour les sols, d'autres ne s'appliquent qu'en intérieur ou inversement[14].

E) Mortier de jointoiment

Le mortier de jointoiment est utilisé essentiellement pour réaliser des joints de pavés entre différents types de revêtement sol extérieur et intérieur (pavés, brique, pierre...). Il est

généralement constitué d'un mélange de sable et de ciment, bien qu'il soit possible de se passer de sable dans ce cas précis. [14]

F) Mortier hydrofuge

Comme son nom l'indique, le mortier hydrofuge est résistant à l'eau ce qui en fait l'allié idéal des espaces humides. Il s'agit d'un mortier classique à base de ciment ou de chaux auquel on ajoute des adjuvants chimiques et de la résine. Principalement utilisé en salle de bain ou en extérieur pour réaliser des joints de piscine par exemple, il s'emploie en réalité dès qu'on souhaite éviter des problèmes d'humidité ou concevoir des réalisations étanches [14].

g) Le mortier réfractaire

est un mortier résistant aux hautes températures. Il se destine uniquement aux constructions particulièrement exposées à des températures élevées, foyers de cheminées et barbecues maçonnés principalement. S'il est bien préparé, il peut résister à des températures allant jusqu'à 800 degrés mais il ne s'emploie jamais sur des constructions qui ne sont pas confrontées à cet environnement. On le double généralement de briques réfractaires pour assurer une meilleure protection [14].

H) Mortier de scellement

Le mortier de scellement est un mortier constitué de ciment et résine qui se destine au calage et scellement à haute résistance. Il est souvent utilisé pour fixer une pièce dans un ouvrage, généralement en béton, pour caler des machines d'industrie ou d'autres gros travaux. C'est un produit qui a la particularité d'être un mortier à retrait compensé et qui possède la plus haute résistance de tous les mortiers. [14].

I) Mortier de ragréage

Le mortier de ragréage est obtenu à partir d'un mélange de sable, ciment et eau auquel on ajoute des fibres, pour un ragréage fibré, ou un adjuvant hydrofuge. Il sert à la finition et peut être employé pour du ragréage sol intérieur comme extérieur en fonction de sa composition et de vos besoins. Il rattrape les imperfections et limite l'apparition des fissures futures, c'est donc un mortier permettant un ragréage auto nivelant.

Pour plus d'informations, sachez que tous ces mortiers sont disponibles dans le catalogue mortier de Distriartisan à un rapport qualité prix imbattable [14].

I.5 Le domaine d'utiliser le mortier

À la différence du béton, le mortier ne comporte pas de gravillons dans sa composition. Il est utilisé pour la réalisation de joints, d'enduits, de chapes et de divers travaux tels que scellement, reprise d'enduit, rebouchage, etc.

Les mortiers sont donc utilisés aussi pour assurer la stabilité d'ouvrage, solidariser les éléments entre eux, combler les interstices entre les blocs et assurer la protection contre l'humidité. [13].



Figure I.12 : Le domaine d'utilisation le mortier

I.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une étude bibliographique sur le mortier, ses composants et son utilisation, en mentionnant ses types. Nous avons présenté tout ce qui concerne le ciment, histoire du ciment et la façon dont le ciment est fabriqué en général, ainsi qu'on Algérie, les réactions chimiques du ciment et leurs types ont été évoqués. Enfin nous avons terminé ce chapitre en évoquant l'impact du ciment sur l'environnement.

Chapitre II
L'argile et la calcination

II.1 Définition et Origine

Il n'existe pas de définition unique du terme « argile ». Deux connotations englobent le mot « argile » l'une liée à la taille des grains et l'autre à la minéralogie. La définition dépend de la discipline concernée. Le géologue et le pédologue considèrent comme “ argile ” tout minéral de faible granulométrie, la limite étant fixée à 2 μ m. Les ingénieurs s'attachent plutôt aux propriétés de plasticité des matériaux argileux quelle que soit leur taille. Les Céramistes regroupent les matériaux selon leur comportement au chauffage V. K. Gupta, R. Kumar, A. Nayak, T. A. Saleh, and M. A. Barakat, *Adv. Colloid Interface Sci.* 193–194, 24 (2013) .[15]

En général l'argile est définie comme étant toute fraction du sol d'aspect granulométrique et de taille inférieure à 2 μ m. Cette fraction contient majoritairement des minéraux argileux mais aussi des minéraux accessoires de type quartz, oxydes de titane de très petite taille.

Les minéraux argileux sont des aluminosilicates appartenant à la famille des phyllosilicates hydratés, microcristallins, à structure en feuillets (phyllics) provenant de l'altération géochimique et biochimique progressive des minéraux primaires du sol contenant divers éléments tels que le fer, le magnésium, le calcium et le potassium. Cette structure en feuillets, dont la surface basale est bien plus importante que l'épaisseur, permet à certaines espèces d'argiles d'adsorber de grandes quantités d'eau par adhésion et leur confère une forte réactivité chimique et physique, ce qui leur donne leur plasticité et fait gonfler certaines variétés. [15] .

II.2 Les différentes couleurs d'argile[16]

- L'argile blanche, aussi appelé kaolin ou kaolinite
- L'argile verte
- L'argile jaune
- L'argile rouge
- L'argile rose
- L'argile violette
- L'argile bleue



Figure II .1 :les différentes couleurs d'argile

II.3 Les différents types d'argile

Peu partout dans la terre en différentes proportions.

II .3.1 La kaolinite

Les minéraux argileux (1 : 1 ou T-O) de 7,2 Å d'épaisseur sont les kaolinites (figure II-2 et II-3)

Dans le cas où deux feuillets sont superposés, les H⁺ se trouvant sur la surface inférieure et les O⁻ de la surface supérieure créent entre eux une liaison hydrogène (O-H) forte. Une grande stabilité est assurée entre la liaison hydrogène et la liaison de Van der Waals pour faire face à l'action de l'eau. De ce fait, les minéraux argileux kaolinites sont stables et leurs structures élémentaires sont protégés vis-à-vis de l'eau.

La faible valeur de la surface spécifique (45m².g-1) et le nombre élevé de feuillets par particule de kaolinite expliquent la forte liaison hydrogène entre les feuillets.[20].

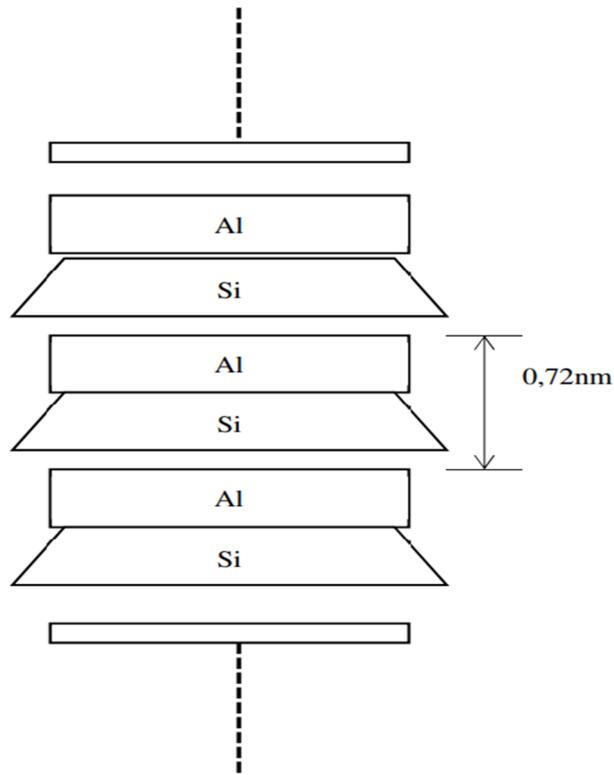


Figure II .2 : Structure schématique de la kaolinite

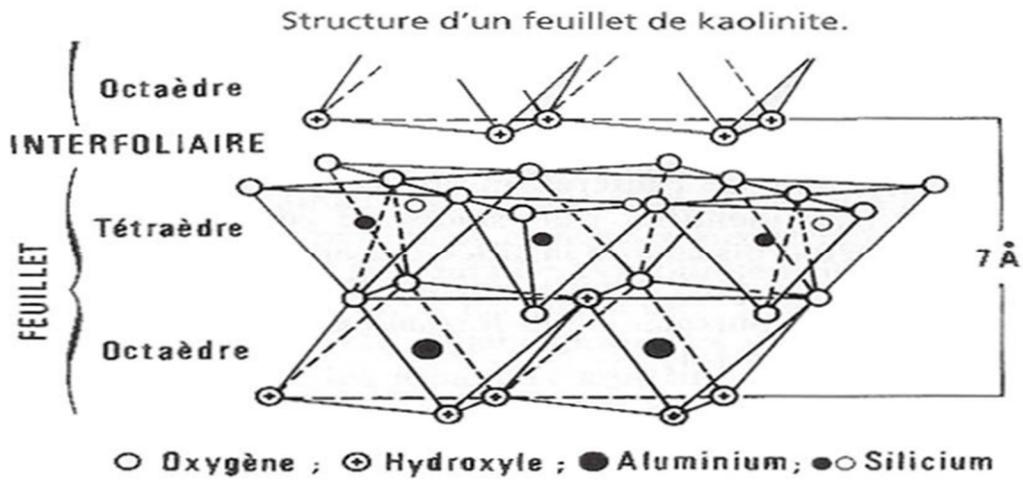


Figure II .3 : Vue isométrique de la structure atomique de la kaolinite

la montmorillonite est constituée des feuillets élémentaires de type 2 pour 1 ou T : O : T. Elle est caractérisée par deux couches tétraédriques de silice entourée d'une couche octaédrique d'alumine. L'empilement des feuillets n'est pas ordonné. « Chaque feuillet est tourné dans son plan par rapport au précédent et a une extension latérale extrêmement importante par rapport à son épaisseur qui est estimée à 9,6 Å » (Figure II -4)(Figure II .5)

Par ailleurs, la montmorillonite possède une grande sensibilité à l'eau et un gonflement conséquent dans la mesure où des molécules d'eau s'infiltrent entre les feuillets. Les feuillets ont des épaisseurs qui varient de 9,6 Å à 15 Å. En fonction de la nature de cation compensateur et la présence d'humidité entre les feuillets, leurs épaisseurs augmentent encore plus., « article scientifique sur des Caractéristiques physico-chimique des tuiles en micro-béton fabriquées localement à base de la gomme arabique », Ecole Polytechnique d'Abomey Calavi, 4-5, vol 1-15, p 15 (2013). [20]

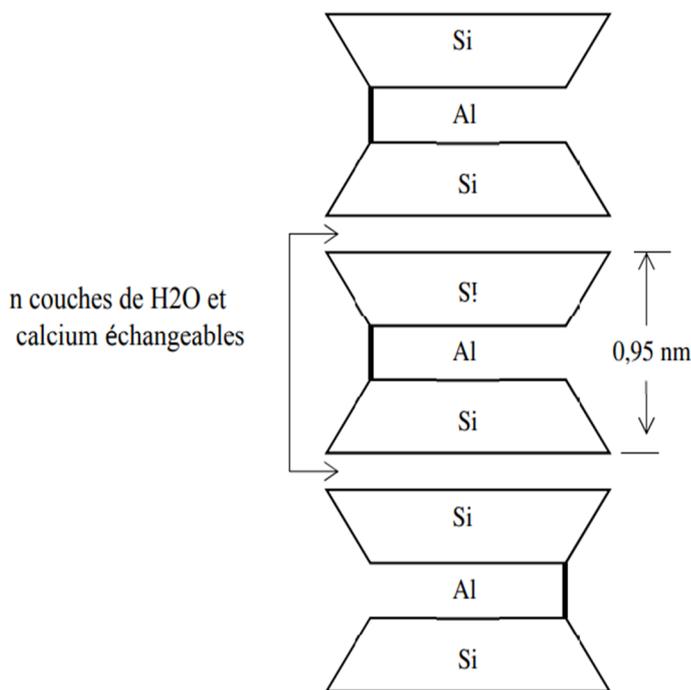


Figure II .4 : Schéma de la structure de la montmorillonite

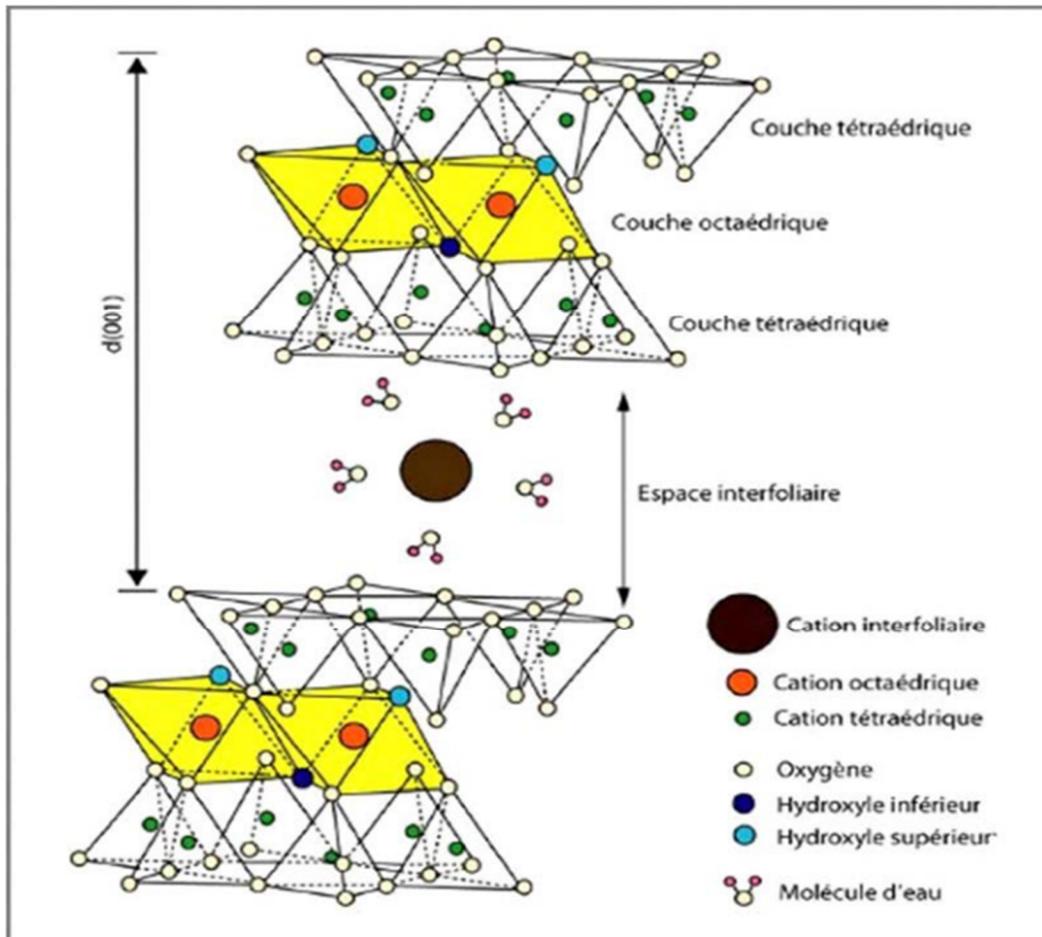


Figure II .5: Schéma de la structure de la montmorillonite

II .3.2 illite

La structure de l'illite de type 2 pour 1 est proche de celle de montmorillonite. La différence est que cette dernière présente un déficit de charge dû au remplacement des ions par des cations de potassium K^+ (figure 1-11). L'avantage des cations potassium (K^+) est qu'il arrive à remplir la cavité dans lequel il est logé. Les ions potassium anhydre arrivent à assurer une liaison forte entre les feuillets, ce qui empêche la pénétration des molécules d'eau entre ces feuillets et en même temps maintenir l'espace interfoliaire fixe à 9,6 Å. Par conséquent, l'illite possède une Stabilité face à l'eau par rapport à la montmorillonite . [20]

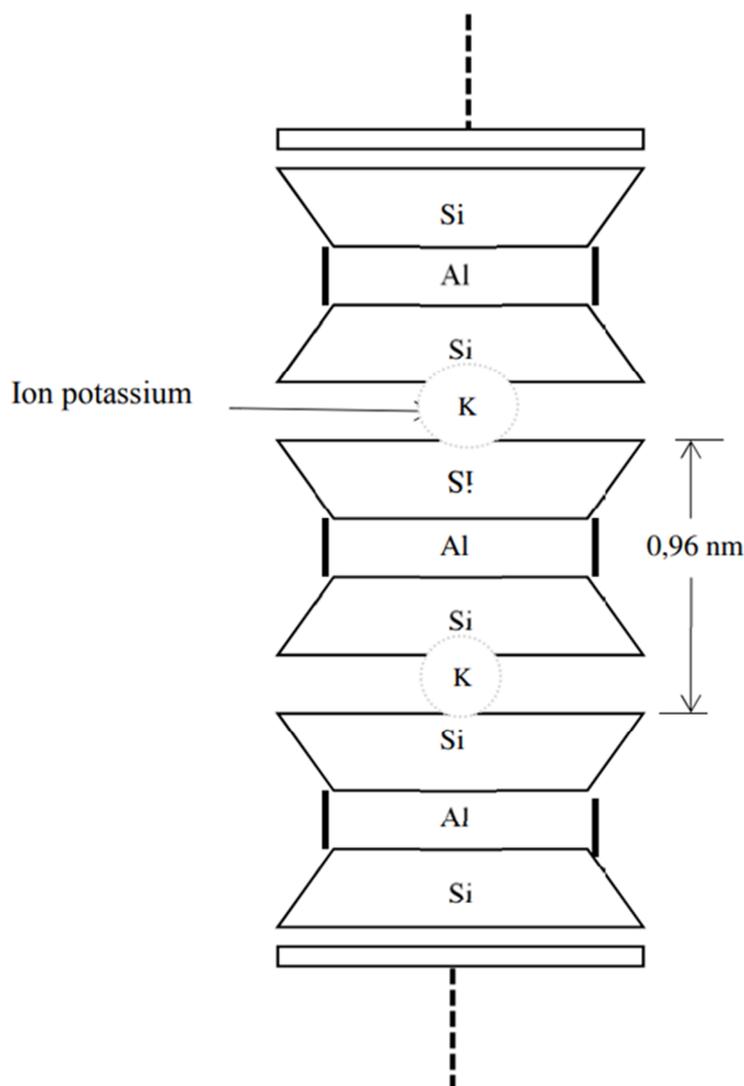


Figure II.6 : Schéma de la structure de l'illite

II.4 Classification des argiles

La classification que nous avons adoptée et qui correspond au schéma international été utilisée par CAILLÈRE et COLL. (S. CAILLÈRE, S. HENIN et M. RAUTUREAU, « Minéralogie des argiles 2, » [18]

Classification et nomenclature », 2ème édition, Masson, Paris, 9-120, (1982). Elle envisage le groupe, le sous-groupe et l'espèce (ou la famille).

Le groupe est caractérisé d'abord par l'épaisseur du feuillet ou mieux par sa constitution. Chacun correspond à l'empilement d'un nombre variable de couches d'oxygène et d'hydroxy (figure II -7). Les unités de ces groupes se subdivisent chacune en deux sous-groupes suivant que les couches octaédriques sont di- ou tri-octaédriques. Le troisième niveau, celui des espèces, n'est pas défini par des propriétés homogènes. Dans certains cas, c'est la

nature des cations du plan octaédrique qui a été retenue, dans d'autres cas c'est l'équipement des feuillets.

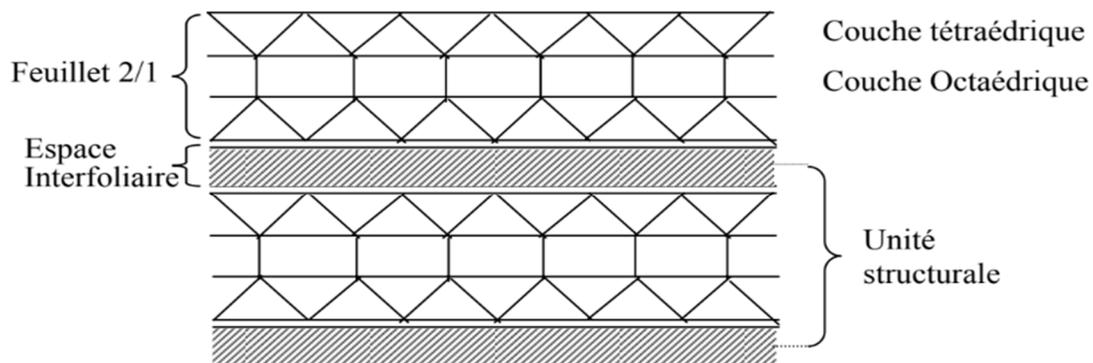


Figure II. 7 : Schéma de la structure générale d'une argile

Nous donnons ici certaines familles de ces groupes jugées d'importance particulière

II .4.1 Minéraux à 7 Å :

Les minéraux de ce groupe sont caractérisés par une structure comprenant une couche tétraédrique et une couche octaédrique.

-Famille de la kaolinite (**Figure I.7**)

Formule générale de la demi-maille : $\text{Si}_2\text{O}_5\text{Al}_2(\text{OH})_4$

Il s'agit d'une minérale phyllie de couleur blanche, blanche-grise ou légèrement jaunâtre. Il se présente sous forme de masse onctueuse au toucher, parfois compacte. Sa densité varie de 2,4 à 2,64.

Ces minéraux sont peu attaquables par les acides, excepté l'acide fluorhydrique. A l'analyse thermique différentielle, les minéraux de ce groupe sont caractérisés par :

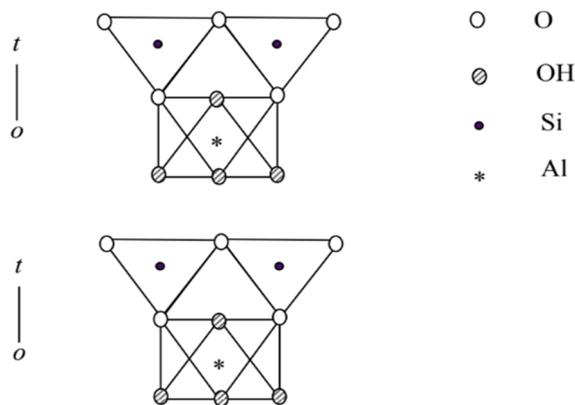
Un phénomène endothermique assez accentué qui commence à se manifester vers 500 °C et dont le maximum de développement a lieu entre 530 °C et 560 °C.

Un phénomène exothermique qui se traduit par un crochet aigu, parfois très développé prenant naissance vers 950 °C avec un maximum vers 980 °C. L'importance de ce phénomène varie avec le minéral étudié, mais ces variations ne peuvent pas être utilisées comme critère.

En effet, la présence d'oxyde de fer, même en faible quantité, abaisse la température d'apparition de cet accident et le transforme en une faible bosse. Toutefois les caractères

essentiels sont suffisamment stables pour permettre, en général, une identification de l'espèce. Les principales raies RX sont : d (Å) : 7 ;15 ; 3,55 ; 2,33; 1,49.

Comme caractéristique spécifique des minéraux de cette famille, on notera la disparition des



raies à 7,15 et 3,55 Å, par chauffage prolongé à 550 °C. [18]

Figure II .8 : Schéma de la structure de la Kaolinite

• **Famille de l'halloysite :**

Formule générale de la demi-maille: $Si_2O_5Al_2(OH)_4nH_2O$

n : généralement voisin de 2

Elle se limite à un seul minéral. L'halloysite est constituée de feuillets identiques à ceux de la kaolinite, mais séparés par une couche de molécules d'eau, si bien que L'équidistance 001 est de 10,1 Å.

Par déshydratation vers 75 ou 80 °C, parfois même par un long séjour au laboratoire, le minéral perd une partie de son eau et se transforme en métahalloysite S. CAILLERE, S. HENIN et M. RAUTUREAU, « Minéralogie des argiles 2, classification et nomenclature », 2ème édition, Masson, paris, 9-120, (1982).. Toutefois, d'après BRINDLEY et GOODYEAR (G.W BRINDLEY, et J. GOODYEAR, "Mineralogical magazine", 28, 407, (1948).)[18] la transformation n'est totale que vers 400 °C.

Ce minéral se trouve le plus souvent en masses terreuses sous une grande variété décoloré blanche, grisâtre, jaunâtre, verdâtre ou rougeâtre. Sa densité varie entre 2 et 2,20.

A l'analyse thermique différentielle le départ de l'eau située entre les feuillets se confond avec celui de l'eau hygroscopique et se manifeste par un fort accident endothermique.

Sur le diagramme des rayons X, les feuillets sont identiques à ceux de la kaolinite mais avec l'intercalation d'une couche d'eau qui porte l'équidistance 001 à 10,1 Å, d'où une confusion possible avec l'illite.

Les principales raies sont : d (Å): 7,2 à 7,5; 4,43; 3,58.

- **Famille l'antigorite :**

Formule générale de la demi-maille : $\text{Si}_2\text{O}_5(\text{M}^{2+})_3(\text{OH})_4$

M^{2+} représente un cation divalent qui, dans le type original, est le magnésium.

Le minéral se présente à l'état naturel sous différentes couleurs blanche, verte, jaune de miel.

Sa densité varie entre 2,40 et 2,65.

L'analyse thermique, on observe:

Un petit phénomène endothermique vers 100 °C;

Un accident extrêmement marqué dont l'origine se situe entre 600 °C et 660 °C et dont le maximum d'amplitude est de 700-750 °C.

Les diagrammes de rayons X présentent de nombreuses singularités dues, en particulier, aux distorsions du feuillet.

Les principales raies sont : d(Å): 7,12; 3,592; 2,514; 8,40; 4,55; 3,30; 3,14; 1,507;[18]

- **Famille de la berthierine :**

Formule générale de la demi-maille:



M^{3+} peut être Al^{3+} ou Fe^{3+}

R^{2+} peut être Mg^{2+} ou Fe^{2+}

La coloration est blanche ou verte plus ou moins foncée. Sa densité varie de 3 à 3,4. La courbe d'analyse thermique montre:

Une légère inflexion vers 100°C;

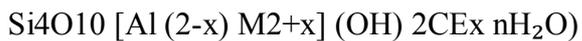
Un phénomène endothermique important vers 400°C, se dédoublant vers 500°C et se terminant vers 670°C par un phénomène exothermique très aigu.[18]

II.4.2 Minéraux à 10 Å :

Les minéraux de ce groupe sont caractérisés par un feuillet qui comporte une couche Octaédrique comprise entre deux couches tétraédriques.

Famille de la montmorillonite

Formule générale de la demi-maille :



M₂₊ représente l'ion Mg²⁺ dans les montmorillonites types.

La caractéristique essentielle de ce minéral est de posséder entre deux feuillets ayant la même composition que celle de la pyrophyllite, un certain nombre de couches d'eau si bien que l'équidistance suivant (001) est essentiellement variable (figure II -13).

Il arrive fréquemment que, dans un même échantillon, on observe des variations du nombre de couches d'eau situées entre les feuillets, en conséquence, le diagramme des rayons X s'apparente au type des minéraux interstratifiés.

Il existe cependant trois équidistances caractéristiques :

- le minéral chauffé à 400°C et maintenu à l'abri de l'eau possède une équidistance comprise entre 9,4 et 10 Å;
- à l'air, une montmorillonite Ca²⁺ a une équidistance voisine de 15 Å
- après saturation à l'éthylène glycol, l'équidistance devient 17,5 Å

La montmorillonite est un minéral onctueux très tendre qui se présente généralement en masses compactes, ressemblant à la paraffine ou au savon. Ce minéral se rencontre sous différentes couleurs ; blanc, gris, blanc-verdâtre, rose plus ou moins clair ou chamois. Sa densité est voisine de 2,04.

La montmorillonite est partiellement soluble dans l'acide chlorhydrique et attaqué totalement par l'acide sulfurique.

- L'analyse thermique différentielle montre : [18]

Un crochet endothermique qui débute à basse température, et se termine vers 250°C. Il est très développé et fréquemment dédoublé. Ce dédoublement est dû à la présence de cations divalents, notamment le calcium et le magnésium dont il traduit le départ de l'eau d'hydratation. Le reste du crochet correspond à la perte d'une eau plus ou moins fortement liée

; Un deuxième crochet endothermique qui débute vers 650°C et atteint son développement maximum vers 700-730°C;

En fin un troisième pic également endothermique, qui apparaît vers 850°C et dont le maximum est situé vers 900°C. Il précède de peu un phénomène exothermique plus ou moins développé et qui se manifeste par un crochet d'intensité variable. Ce crochet, exothermique, est peu marqué ou absent dans le cas des minéraux saturés de cations monovalents, mais présente une intensité appréciable lorsque la montmorillonite a été lessivée par les acides ou saturée par l'aluminium.

Les principales raies RX sont : d (Å) : 4,5 ; 2,55 ; 1,49. Ce sont des raies dissymétriques.

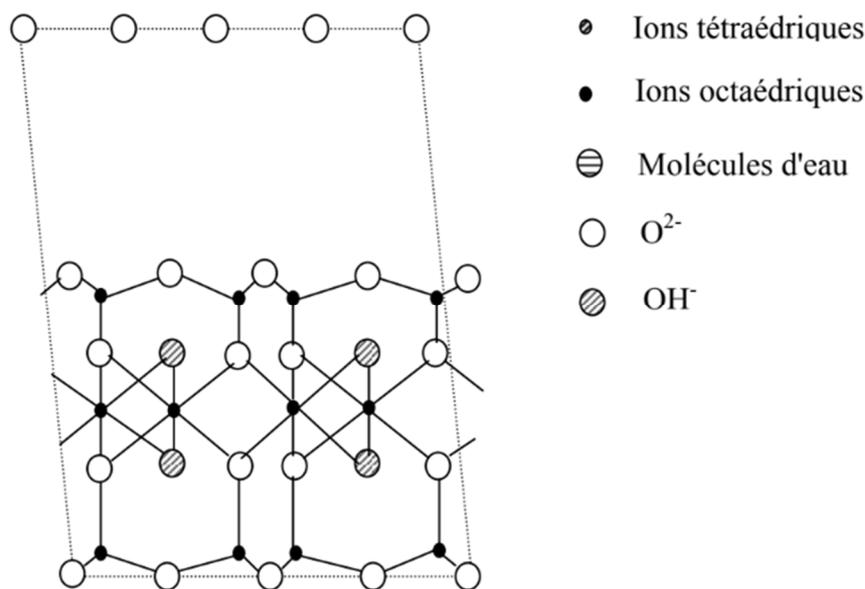


Figure II. 9 : Schéma de la structure de la montmorillonite

• **Famille de L'illite :**

Formule générale de la demi-maille :



La valeur de x est souvent égale à 0,5.

L'illite est un minéral blanc gris, légèrement nacré, parfois vert sombre. Sa densité varie beaucoup avec la teneur en eau hygroscopique entre 2,12 et 2,66. Ce minéral est peu attaqué par les acides.

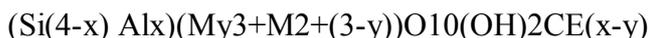
Le digramme d'analyse thermique des illites présente des variations assez importantes. On enregistre un premier crochet endothermique correspondant au départ de l'eau hygroscopique, puis un second crochet également endothermique débutant vers 800°C dont

l'extension atteint 850-870°C. Enfin, la courbe peut se terminer par un phénomène Exothermique plus ou moins développé entre 960°C et 1000°C. Tous ces accidents se présentent sous l'aspect de crochets largement ouverts.

Les principales raies RX sont : $d(\text{Å})$: 9,9; 4,45; 3,35; 2,56.

- **Famille des vermiculites :**

Formule générale de la demi-maille :



x est souvent voisin de 1 et parfois supérieur.

La vermiculite est d'un vert jaunâtre avec un éclat bronzé. La densité de ce minéral est sensiblement égale à celle de mica : 2,2 à 2,5.

Les courbes d'analyse thermique différentielle des vermiculites montrent :

Deux inflexions endothermiques à 150°C et 250°C dues au départ de l'eau d'hydratation. La première inflexion correspond au départ de l'eau libre, la seconde au départ de l'eau d'hydratation des cations ;

Une perte d'eau de structure, très progressive, qui s'étale entre 500°C et 800°C sans donner lieu à aucun pic très net, sauf vers 800°C, où cette inflexion marque la destruction complète du réseau silicate ;

Enfin une réaction exothermique à 800-850°C.

Les principales raies RX de la vermiculite sont : $d(\text{Å})$: 14,2 ; 4,58; 3,51; 1,53

II .3 Minéraux à 14 Å :

Famille des chlorites vrais :

Les chlorites vrais sont des minéraux dans lesquels les feuillets de type mica sont reliés entre eux par un feuillet brucitique chargé positivement et ayant, à cause de cela, une équidistance stable quand ils sont imbibés d'éthyléneglycol.

Les différentes couches d'ions composant les feuillets se succédant avec une analogie parfaite, comme dans les autres minéraux argileux. On rencontre aussi de nombreuses substitutions.

La formule générale de la demi-maille d'un chlorite vraie est :



La coloration des chlorites est verte plus ou moins foncée, parfois blanchâtre. La densité varie entre 2,6 et 2,96. Ces argiles, principalement les variétés riches en fer, sont attaquables par les acides.

Les courbes d'analyse thermique montrent généralement deux pics endothermiques très marqués, l'un entre 600°C et 700°C, le second, ordinairement plus faible vers 800°C. Les courbes d'analyse thermique des chlorites sédimentaires mal cristallisées sont à peu près semblables, mais elles comportent un pic endothermique vers 100-150°C traduisant le départ d'eau adsorbée.

Les principales raies RX sont: d(Å): 14,3; 7,17; 4,78; 3,585; 1,537.

-Minéraux interstratifiés :

Parmi les auteurs qui ont signalé l'existence des minéraux interstratifiés, on peut citer CAILLERE et COLL. [41] S. CAILLERE, S. HENIN et M. RAUTUREAU, « Minéralogie des argiles 2, classification et nomenclature », 2ème édition, Masson, paris, 9-120, (1982).. Dans ces minéraux les feuillets élémentaires sont de natures différentes, en proportions variées et se succèdent plus ou moins régulièrement.

Les minéraux inters ratifiés soulèvent plusieurs problèmes, celui de l'identification de leurs constituants et celui de leur nomenclature.

- Minéraux à pseudo-feuillets et à faciès fibreux :

Les minéraux de ce groupe appartiennent à deux familles, les sépiolites et les palygorskites.

Famille de la sépiolite :

La structure de ces minéraux a été précisée par BRAUNER et PRESSINGER [43] K. BRAUNER et A. PRESSINGER, Min. Pertr. Mitteil., 6, 120, (1956)],

BRINDLEY (G.W. BRINDLEY, Amer. Min., 44, 495, (1959) et RAUTUREAU [45] M. RAUTUREAU, Clay and Clay Min., 24, 43, (1976). (Figure II . 13).

Ce minéral est formé par une série de rubans de type talc associés.

La formule générale de la demi-maille de ce minéral est :



Autrefois, les minéraux de la sépiolite étaient appelés magnésie.

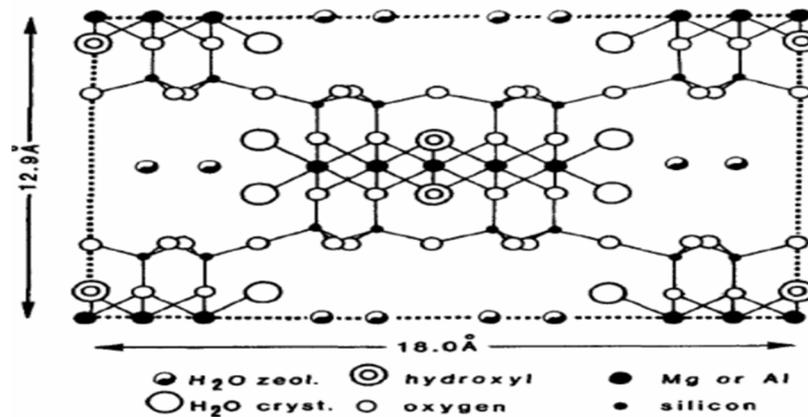


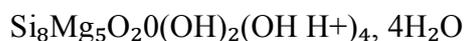
Figure II .10 : Projection sur le plan (001) de la maille de la palygorskite D'après BRAUNER et PRESSINGER

-Famille de la palygorskite :

Le modèle structural de base a été établi par BRADLEY .[46] W.F. BRADLEY, Amer. Min., 25, 405, (1940).

Comme dans le cas de la sépiolite, la palygorskite est formée aussi par des rubans.

La formule générale de la demi-maille est :



A cause de leurs aspects très variés, les palygorskites ont reçu des noms très différents. Un faciès typiquement terreux a été découvert à Attapulgis (U.S.A.), d'où le nom d'attapulgit, connue pour ses applications dans le domaine médical.[18]

II .5 Propriétés physicochimiques d'argile :

Les argiles se caractérisent par un certain nombre de propriétés physicochimiques telles que Capacité d'échange cationique Propriétés de gonflement son pouvoir d'adsorption des polluants

- **La capacité d'échange cationique :**

La capacité d'échange cationique est la quantité maximale de cations que l'argile peut les dorer. L'échange cationique se réalise par un échange entre les cations compensateurs qui se trouvent dans l'espace interfoliaire tel que Na^+ , K^+ et Ca^{2+} et la charge négative qui existe dans les couches d'argile (R.K. LLER ; J. WILEY, New York, 1979, 866) Cette charge résulte de la substitution des cations de valences (présentes dans la couche tétraédrique et octaédrique) avec des cations de charge inférieure.

Dans le cas de la montmorillonite, le déficit de charge se trouve dans la couche octaédrique

(Al³⁺ par Mg²⁺).[17]

- **Gonflement d'argile :**

Le gonflement d'argile est une propriété très intéressante. Elle se définit comme étant l'éloignement des feuillets d'argile les uns des autres par la modification de la force électrique des cations interfoliaires hydratés en milieu aqueux. Le gonflement des argiles se produit alors au niveau de l'espace interfoliaire. La MMT présente un taux de viscosité et de gonflement .[17]

- **Pouvoir d'adsorption des polluants :**

Depuis longtemps, les travaux de recherche ont été consacrés à l'utilisation de l'argile pour réduire la toxicité des polluants (Z. Yang, H. Peng, W. Wang, and T. Liu, "Crystallization behavior of poly (caprolactone)/layered double hydroxide nanocomposites," J. Appl. Polym. Sci., vol. 116, no. 5, pp. 2658–2667, 2010, doi: 10.1002/app.37003.)[17]

L'argile peut adsorber jusqu'à 70% des contaminants Des eaux usées et ceci grâce aux fortes interactions qui existent entre sa surface et la structure des polluants. La montmorillonite a été largement étudiée comme une matrice adsorbante très intéressante grâce à son importante surface spécifique, son abondance et son cout accessible.

Plusieurs études ont été consacrés à l'adsorption des polluants à travers cette barrière (adsorbante E. Bazrafshan, A. A. Zarei, H. Nadi, and M. A. Zazouli, "Adsorptive removal of Methyl Orange and Reactive Red 198 dyes by Moringa peregrina ash," vol. 21, no. March, pp. Nurhana Mohd.) [17] et al ont récemment étudié l'adsorption de cuivre et du Nickel sur des membranes de Kaolinite. Cette étude a montré que la taille des pores et le pH du milieu joue un rôle important pour renforcer le pourcentage de rétention qui peut atteindre 59et 87 % (N. Akter et al., "Journal of Environmental Chemical Engineering Amine modi fi ed tannin gel for adsorptive removal of Brilliant Green dye," Biochem. Pharmacol., vol. 4,)[17]

L'adsorption du toluène par des minéraux argileux a été largement étudiée au cours des dernières décennies et les résultats ont été rapportés par différents auteurs [17]

L'adsorption du méthyl orange par une montmorillonite est généralement exothermique à pH neutre ou acide et suit la cinétique de pseudo seconde ordre même temps

maintenir l'espace interfoliaire fixe à 9,6 Å. Par conséquent, l'illite possède une stabilité face à l'eau par rapport à la montmorillonite.[17]

II .7 Calcination d'argile :



Figure : II .11 La calcination d'argile

La Calcination :

La calcination est une technique de préparation d'échantillon utilisée en chimie analytique qui permet de prendre en compte ce phénomène. Elle consiste à chauffer l'échantillon sous air à haute température (typiquement 500 à 1000°C) pour provoquer des réactions physiques et chimiques et mettre ainsi l'échantillon dans un état de référence. [19]

Pendant le chauffage, l'eau est perdue d'après les courbes DTA/TG/DTG et un mélange de silice et d'alumine amorphes sera formé.

Pour valoriser les argiles, comme substituant partiel du clinker, le traitement thermique appliqué doit assurer la déshydroxylation tout en :

*Eliminant toutes les matières organiques incompatibles avec le ciment.

*Evitant la décarbonatation de la calcite néfaste pour la maniabilité des mortiers et bétons.

La calcination entre 550 et 800 °C des argiles permet le départ de l'eau de constitution (les dés hydroxylation). La structure amorphe rend l'argile plus réactive que celle du départ à la chaux.

Ce qui explique la forte diminution de la concentration en CaO de la solution. En présence de l'eau, la chaux réagit avec l'argile pour former des silicates, aluminates et

aluminosilicates de calcium hydraté qui dépendent de la minéralogie des pouzzolanes et la solubilité des phases cristallines et non- cristallines.[20] [20]-(U.CHINJE MELO, N.BILLONG, «Activité pouzzolanique des déchets de briques et tuiles cuites», African Journal of Science and Technology (AJST), Science and engineering Series Vol. 5, N°1, June 2004, P 92-100). [19]

II .7.1-La calcination flash

La calcination flash, est une calcination très rapide d'un solide, généralement sous forme fine en suspension dans un gaz. La représentation de l'évolution de la température en fonction du temps permet d'obtenir l'historique thermique des particules.

Bien que la plupart des transformations chimiques et physiques aient une cinétique rapide à haute température, le temps très court de résidence dans le four mène à des transformations qui peuvent partiellement ne pas être terminées. Les changements sont cinétiquement bloqués les produits incomplètement dés hydroxylés si le temps d'exposition est trop court. Les propriétés des solides préparés sous ces procédés de chauffage flash, sont différentes de celles des matériaux traités dans des conditions de calcination où l'équilibre chimique et physique a pu être atteint. [21]- (C.BICH, « Contribution à l'étude de l'activité thermique du kaolin :évolution de la structure cristallographique et activité pouzzolanique », thèse pour l'obtention d'un grade de docteur, spécialité génie civil, Institut national des sciences appliquées de Lyon, 2005, P 44-45.)[19].

II .7.2 La calcination lente :

Dans la calcination lente industrielle, la déshydroxylation est complète après avoir mené Lentement l'échantillon à une température suffisamment haute (entre 600°C et 1100°C) pendant un degré suffisamment long (une voir plusieurs heures), comme le montre la figureé (II -17) [19].

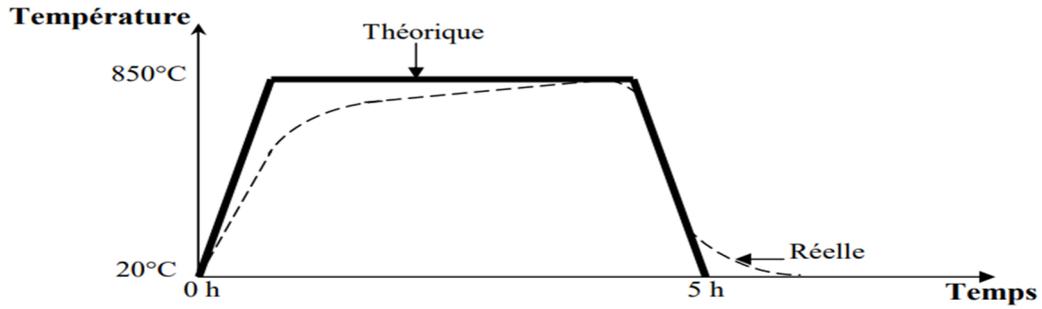


Figure II .12 : Température du four en fonction du temps

II.8 Conclusion :

L'argile c'est un matériau naturel, il compose plusieurs caractéristique chimique et minéralogique avec déférents couleurs et type Traditionnellement utilisées comme matière première.

L'utilisation de l'argile calcinée pour le remplacement du clinker dans le ciment a été vaguement proposé par les chercheurs pour répondre aux exigences de l'environnement ce qui offret une variété des ciments pour l'extraction un eco-ciment.

Chapitre III
Caractérisations des matériaux

III.1 Introduction :

Dans ce chapitre on présente les différents matériaux utilisés ; ainsi que leurs caractéristiques, entrant dans la composition des mortiers à confectionner et cela par des essais au laboratoire, ces matériaux sont purement locaux.

➤ Les matériaux utilisés :

- Sable
- Eau de gâchage (eau de robinet).
- L’ajout : argile calcinée (Elyoun, Wilaya de TISSEMSSILT)
- Le ciment EL mokawim CEMI 42.5

III.2 Caractérisation des matériaux utilisée

III.2.1 Le ciment CEMI :

Le ciment utilisé pour confectionné le mortier , est un CEMI 42.5 produit par GICA-Algérie, conforme à la norme Algérienne 442, 2003[19], et la normalisation européenne NF EN 197- 1 dont Les caractéristiques physiques, La composition chimique, La composition minéralogique du clinker selon les formules de Bogue (Tableau 1), sont Présents ci-après.

Tableau : III . 1 caractéristiques techniques du ciment (EL mokawim)

Caractéristiques techniques	Ciment El mokaouem
Analyse chimique	
Perte au feu (%)(NA5042)	0,5 à 3 %
Teneur en sulfate (SO ₃)%	1,8à3
Teneur chlorures (NA5042)%	1,2 à 3
Teneur en oxyde de magnésium Mgo %	<0 .1
Composition minéralogique du clinker	
C ₃ A(%)	<3 .0%
Propriétés physique	
Consistance normale	25à28

Finesse suivant la méthode de baleine cm ² /g	3200à3800
Retrait de 28 jours µm/m	<1000
Expansion (mm)	<2.0
Temp de prise (min)	
Début de prise	>60
Fin de prise	240 à 400
Résistances de compressiion	
2 jours (MPa)	≥10
28 jours (MPa)	≥42 ,5



Figure III.1 :le sac de ciment El mokaouem

III.2.1.1 Essai de consistance et prise de ciment :

Cet essai est de calculer le rapport eau /ciment (E/C) d'une pâte de ciment d'une consistance normale qui est la quantité d'eau nécessaire pour avoir une pâte de ciment d'une sonde cylindrique sous l'effet d'une charge constante (tige +sonde amovible) de 300 g et à déterminer le temps disponible pour la mise en œuvre.



Figure III.2 Appareille de Vicat

➤ **Mode opératoire :**

- ✓ Peser une quantité de ciment, soit $m_c = 500$ g
- ✓ Choisir un rapport E/C et peser la quantité d'eau. On peut commencer avec un poids de $m_e = 27\% m_c$ (c à dire E /C=27%)
- ✓ Introduire l'eau dans la cuve puis le ciment en 5 à 10 secondes.
- ✓ Mettre immédiatement le malaxeur en marche à vitesse lente pendant 90 s
- ✓ Arrêter le mouvement, démonter le batteur et récipient, racler les parois du récipient puis remonter le tout en une durée d'environ 15 s.
- ✓ Recalage de la cuve c'est de Remettre le malaxeur en marche pour une durée de 90 s.
- ✓ Après ces opératoire, introduire rapidement la pâte dans le module tronconique posé sur une plaque de verre sans tassement ni vibration excessive.
- ✓ Enlever l'excès de la pâte par un mouvement de vat -et -vient grâce à une truelle maintenue perpendiculaire à la surface du moule.
- ✓ Placer l'ensemble sur la platine de l'appareil Vicat.
- ✓ Guider la sonde s'immobiliser, ou au plus tard de 30 secondes après l'avoir relâchée.

On mesure la distance d entre l'extrémité de la sonde et la fond ou moule. Cette distance d caractérise la consistance.

	Masse de ciment (g)	Masse d'eau (g)	D (enfoncement)
Essai 1	500	130	10
Essai 2	500	125	5

La valeur de E/C = 25 %, Ces résultats sont cohérents avec son inclusion dans la fiche technique de ciment.

III.2.2. Le sable :

Le sable utilisé est un sable naturel de la région de << ELGEULTA >>, wilaya de Tiaret



Figure : III . 3 Analyse granulométrique

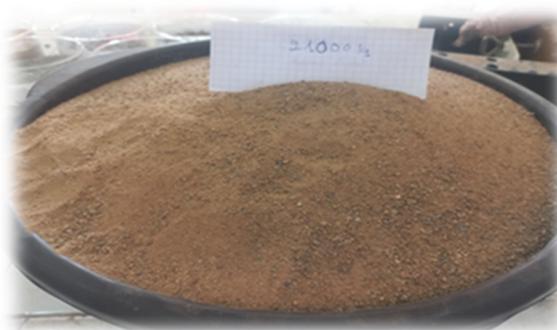


Figure : III . 4 : La granulométrie du sable corrigée

Tableau III.2: Analyse granulométrique du GEULTA

Tamis (mm)	Refus Partiel (g)	Refus cumule (g)	Refus cumule (%)	Tamisât Cumule (%)
5	0	0	0	100
4	0	0	0	100
2,5	15	15	1	99
2	4	19	1,27	98,73
1,25	62	81	5,4	94,6
0,63	91	172	11,47	88,53
0,315	643	815	54,33	45,67
0,16	580	1395	93	7
0,125	57	1452	96,8	3,2
0,08	48	1500	100	0

Norme Française [NFP 18-540] : Le module de finesse est égal au 1/100e de la somme des refus cumulés exprimée en pourcentages sur les tamis de la série suivante : 0,16 - 0,315 - 0,63 - 1,25 - 2,5 - 5 mm

Module de finesse : $\sum RC\% = \frac{(1,25; 0,63; 0,315; 0,16; 2,5)}{100} = 1,65$ (selon la norme NA EN 12620, le sable est très fin).

En fonction des résultats obtenus et afin d'obtenir des résultats acceptables, nous avons décidé de corriger cet échantillon selon la composition granulométrique déterminée par tamisage, conforme aux exigences des normes EN 196-1 et ISO 679 : 2009

Tamis (mm)	Refus cumule (g)	Refus cumule (%)	Tamisât Cumule (%)
5	0	0	100
2.5	15	1	99
1,6	30	2	98
1.25	136,95	9,13	90,87
1	420	28	72
0.63	733,05	48,87	51,13
0.5	930	62	38
0.315	1312,95	87,53	12,47
0.16	1395	93	7
0.08	1500	100	0

Module de finesse : $\sum RC\% = \frac{(1,25 ; 0,63 ; 0,315 ; 0,16 ; 2,5)}{100} = 2,39$ (selon la norme NA EN 12620, le sable est moyen).

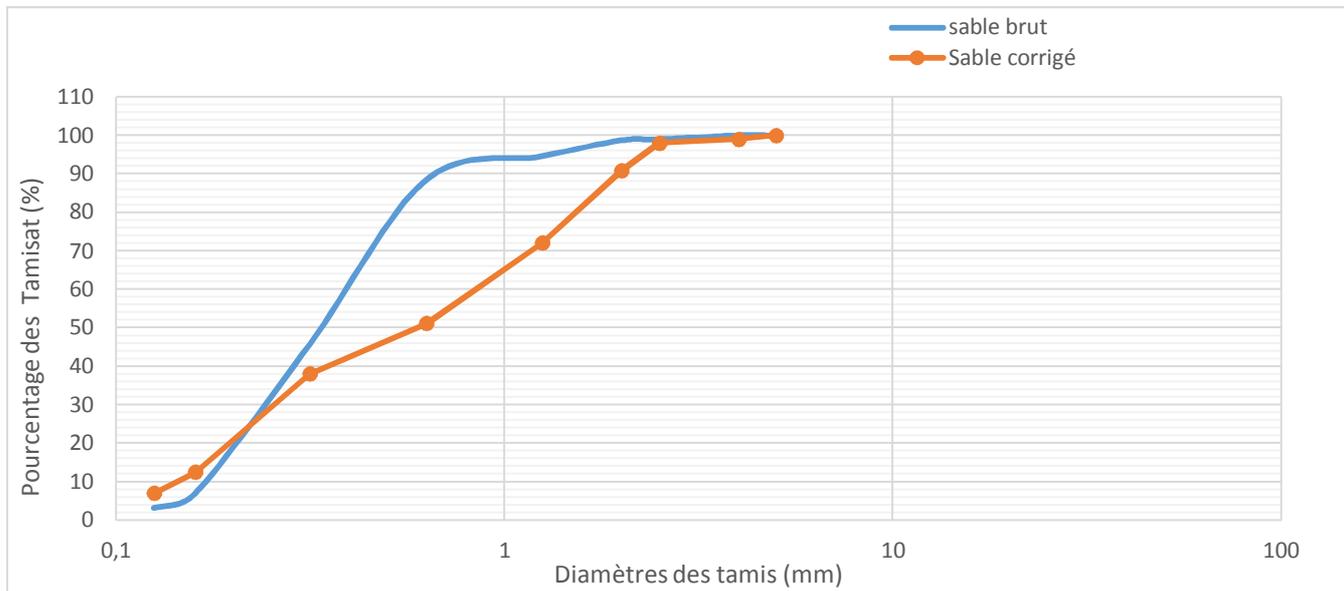


Figure : III.5 : L'analyse granulométrique de sable brut et corrigé

III.2.2.2 Masse volumique apparente :

La masse volumique apparente : c'est la masse des grains secs occupant l'unité de volume, c'est-à-dire la masse du volume constitué par la matière du corps et les vides qu'elle contient (comprenant à la fois des vides de la particule ainsi les vides entre particules) . Elle est comprise entre 1400 et 1600 Kg/m³ pour les granulats courant)

➤ Equipement et matériaux :

Un récipient cylindrique d'un volume connu.

Une balance pour peser ; précision 1g

➤ Mode opératoire :

- ✓ Peser le récipient à vide ; soit M1
- ✓ Prendre les granulats dans les deux mains formant un entonnoir.
- ✓ Remplir le moule de mesure on plaçant les mains à 10 cm environ au-dessus de moule et laisser tomber le matériau au centre, ni trop
- ✓ Une réglé à araser métallique
- ✓ Granulats (sable et gravier).
- ✓ Vite ni trop lentement.
- ✓ Eviter toute vibration du moule et araser la surface du moule à l'aide de la spatule.
- ✓ Peser le moule rempli du matériau, soit M2



Figure : III .6 la masse apparente

➤ Calculs et résultats :

Calculer la masse volumique apparente :

$$Mv_{app} = \frac{M}{V_{app}} \text{ (kg /m}^3\text{)}$$

M_{vapp} : masse volumique apparente, en kg

M : masse l'échantillon, en kg

V_{vapp} : volume apparent de l'échantillon = Volume de moule = 1 litre .

Tableau III.3: Masse volumique apparente du sable.			
Essai	M ₁ (g)	M ₂ (g)	γ _{vapp} (g/cm ³)
	1476	456	1.02

La masse volumique absolue (ρ):

La masse volumique absolue (spécifique) (est la masse d'un corps par unité de volume de la matière pleine sans aucun vide entre les grains.



Figure III .7 : La masse absolue

➤ **Mode opératoire :**

- Remplir une éprouvette graduée avec un volume ρ₀ D'eau.
- Peser Un échantillon sec ρ₁ De granulats et l'introduire dans l'éprouvette en prenant soin d'éliminer tous les bulles d'air.
- Le liquide montre dans l'éprouvette, lire le poids de l'ensemble ρ₂ .
- La masse volumique est alors

$$\rho_g = \frac{\rho_1 \times \rho_2}{(\rho_0)}$$

Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau III.4: Résultats de la masse volumique absolue « sable ».		
Masse volumique	Mesures	Essai
Absolue	Volume d'eau V1 (ml)	600
	Masse de l'échantillon M1(g)	300
	Volume d'échantillon V2 (ml)	710
	Masse volumique absolu $M/V_{aps} (g/cm^3)$	2.72

III.2.2. 3 : Essai d'équivalent de sable

But de l'essai :

Cet essai est utilisé de manière courante pour évaluer la propreté des sables entrant dans la composition des bétons, l'essai consiste à séparer les particules fines contenues dans le sol des éléments sableux plus grossiers.

Une procédure normalisée permet de déterminer le coefficient d'équivalent de sable qui quantifie la propreté de celui-ci.

Principe de l'essai :

L'essai est effectué sur la fraction 0/2 mm du matériau à étudier. On lave l'échantillon, selon un processus normalisé, et on laisse reposer le tout. Au bout de 20 minutes, on mesure les éléments suivants :

- Hauteur h_1 : sable propre + éléments fins,
- Hauteur h_2 : sable propre seulement.
- On en déduit la valeur de l'équivalent de sable par l'équation suivante :

$$ES = \frac{h_1}{h_2} \times 100$$

- Selon que la hauteur h_2 est mesurée visuellement ou à l'aide d'un piston, on détermine ES_v (équivalent de sable visuel) ou ES_p (équivalent de sable au piston).



Figure : III .8 Equivalent de sable (au niveau de laboratoire LTPO Tiaret)

	Ech 1	Ech 2
Mesurer h1	23,3	24,4
Mesurer h2	9,5	10,1
Mesure h'	7,2	8,8
ES (piston)=100 *h ₂ /h ₁	ES ₁ =40,77	ES ₂ =41,39
Es (visuel)=100 *h' ₂ /h ₁	ES ₁ =30,9	ES ₂ = 36,06
	ES moyen (PISTON) =41,08	
	ES moyen (VISUEL)=33,48	

ESV (%)	ES (%)	Qualité de sable
ESV < 65	ES < 60	Sable argileux : risque de retrait ou de gonflement à rejeter pour des bétons de qualités.
65 ≤ ESV < 75	60 ≤ ES < 70	Sable légèrement argileux de propreté admissible pour béton de qualité courante quand on ne craint pas particulièrement le retrait
75 ≤ ESV < 85	65 ≤ ES ≤ 80	Sable propre à faible pourcentage de fines argileux convenant parfaitement pour les bétons de haute qualité.
ESV ≥ 85	ES >80	Sable très propre: l'absence presque totale de fines argileuses risque d'entraîner un défaut de plasticité du béton qu'il faudra rattraper par une augmentation du dosage en eau.

Les résultats : ESP= 41,08 < 60 et ESV=33,48 < 65 Donc le sable et argileux Risque de retrait ou de gonflement à rejeter pour des bétons.

III.2.2.4 Bleu de méthylène :

➤ **Le principe et le but de bleu de méthylène :**

Mesurer la capacité d'absorption de bleu de méthylène d'un sol ou d'un matériau rocheux.

Détermination de la valeur de bleu de méthylène d'un sol ou d'un matériau rocheux par l'essai à la tache.

Caractériser, l'argilosité d'un matériau.

L'essai consiste à doser la quantité de bleu méthylène absorbée par la fraction 0/5 mm du matériau mise en suspension dans l'eau.

Cette quantité est rapportée à la fraction 0/50 mm du matériau.

✓ **Si la tache centrale est entourée d'une auréole bleu turquoise**

Le test est positif dans ce cas l'essai est terminé les particules argileuses sont alors saturées en bleu de Méthylène. on recommence l'essai à l'identique cinq fois (intervalle d'une minute pour le confirmer).

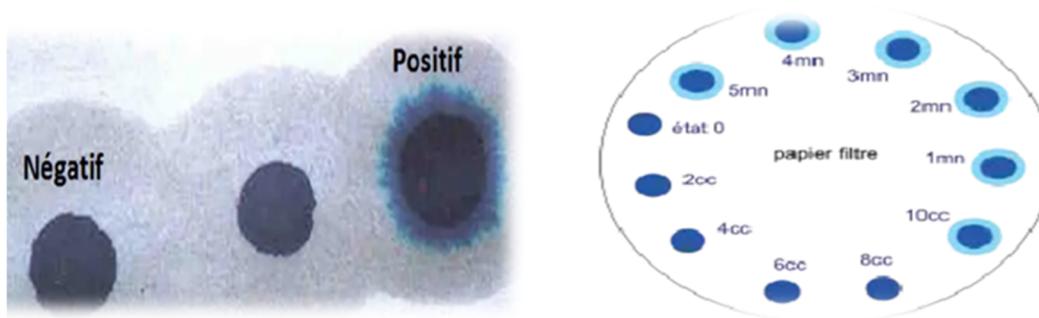


Figure : III.9 La tache de l'auréole

➤ **Valeure de bleu de méthtylène et catégorie de sol :**

$VBS < 0,1$

$0,2 \leq Vbs < 1,5$

$1,5 \leq VBS < 2,5$ Sol sablo argileux ,peu plastique

$2,5 \leq VB_s < 6$ sol limoneux de plasticité moyenne

$6 \leq V_{bs} < 8$ sol argileux

$V_{bs} >$ très argileux



Figure III .10 Essai bleu de méthylène (au niveau de l'aboratoire LTPE Tiaret

Masse de refus (g)	Q	V (ml)	VB
277	23	43	1,86

Le résultat :

$1,5 < 1,86 < 2,5$ Sol sablo argileux, peu plastique

III.2.3 L'argile

Ces argiles proviennent de région Tissemsilt «Elayon» Ils ont été concassés manuellement au niveau du laboratoire de génie civil Université de Tiaret, puis broyés jusqu'à la fraction granulaire fin.



Figure III .11 : la préparation de l'argile (la calcination)



Figure III .12 : Le Diffractomètre (Laboratoire de synthèse et catalyse TIARET)

Le résultat de DRX :

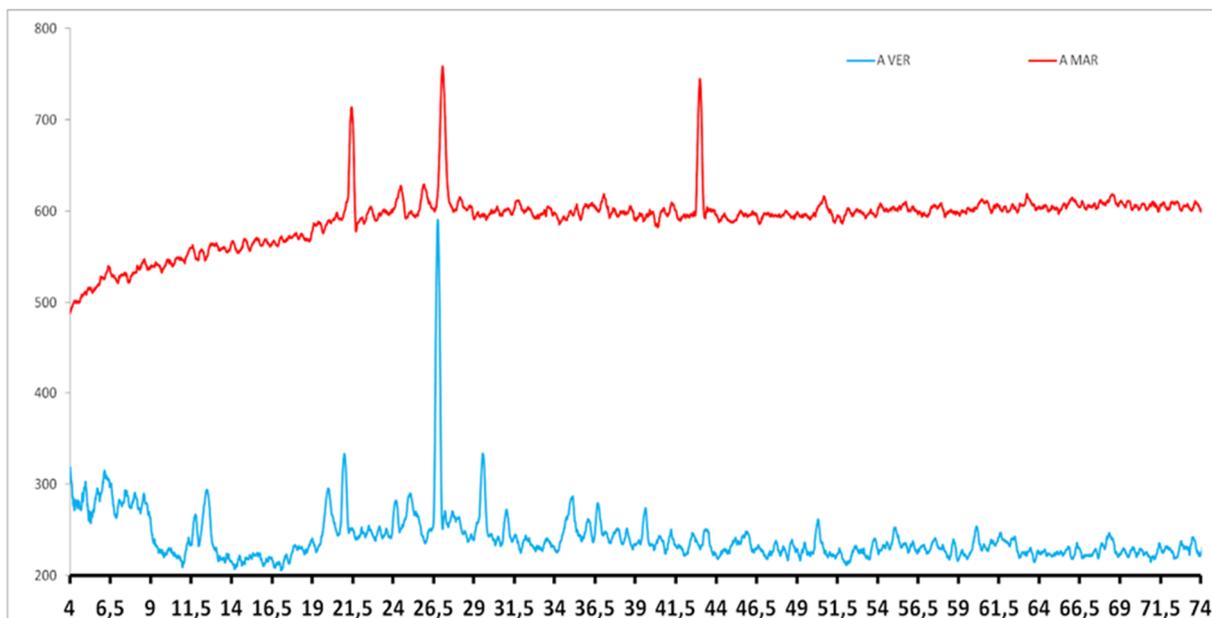


Figure : III.13 le diffractogramme de l'échantillon calciné et brute

La diffraction des rayons X (DRX) est utilisée pour estimer les principaux minéraux présents dans l'argile brute avant et après calcination.

L'analyse par diffraction des rayons X a été réalisée au Laboratoire Synthèse et Catalyse au niveau de la faculté des Sciences de la Matière. Les diffractogrammes DRX ont été obtenus à température ambiante avec un diffractomètre Rigaku, Mini Flex 600.

À partir des diffractogrammes DRX de l'A VER (avant calcination), les minéraux argileux Identifiés étaient la kaolinite, illite et le chlorite, avec quelques traces de montmorillonite. Les minéraux associés étaient le quartz (Q) et la calcite. Généralement, la déshydroxylation de l'argile brute pendant le traitement thermique eut être suivie via une perte de masse et des réactions endothermiques.

Le premier pic à 500°C indique la dés hydroxylation de la kaolinite suivie d'une dés hydroxylation partielle des minéraux argileux interstratifiés 2:1 (illite-smectite et muscovite) vers 715°C.

Vers 800°C, une perte de masse attribuée au dégagement de CO₂ issu de la décarbonatation partielle de la calcite est enregistrée.

Les pics de diffraction de la kaolinite ($\sim 12,47^\circ$ et $\sim 19,99^\circ$) ne sont pas présents dans échantillon A MAR (argile calcinée), on peut en conclure que la kaolinite a été complètement convertie en sa forme amorphe, la métakaolinite. Réduction de la réflexion basale ($\sim 6,15^\circ$) de la montmorillonite passant à 2θ plus élevé ($\sim 6,4^\circ$) à en raison de élimination de l'eau entre les couches. Au-delà de 800°C , les réflexions de la chlorite disparaissent.

L'intensité de la réflexion de l'illite ($\sim 8,6^\circ$) se réduit, sachant tout de même que la dégradation structurelle de l'illite se produit vers 930°C . Le quartz présent dans l'A VER reste inchangé après la calcination

III.2.2.4 Préparation de mortier :

➤ Préparation de mortier

- ✓ Un malaxeur normalisé .
- ✓ Une balance ,précision 1 g.
- ✓ Des moules normalisé permettant de réaliser 3 éprouvettes prismatiques de prismatiques de section carrée 4.
- ✓ Un appareil à chocs permettant d'appliquer 60 chocs aux moules en les faisant chuter d'une hauteur de $15\text{ mm} \pm 0,3\text{ mm}$ à la fréquence d'une chute par seconde pendant 60s .
- ✓ Une machine d'essais à la compression permettant d'appliquer des charges jusqu'à 150 KN avec une vitesse de mise en charge de $2400\text{ N/s} \pm 200\text{ N/s}$.

➤ Matériaux utilisés :

Pour la composition du mortier à tester ,soit un mortier (1/3) :

- ✓ Sable normalisé = $1350\text{ g} \pm 5\text{ g}$
- ✓ Un ciment normalisé M = $450 \pm 2\text{ g}$
- ✓ Eau de gâchage, le rapport E /c choisi pour la confection du mortier est de 0,5, soit une quantité d'eau égale à $225\text{ g} \pm 1\text{ g}$.
- ✓ Pour le décoffrage et nettoyage.
- ✓ Huile de décoffrage.
- ✓ Eau pour nettoyage.

➤ Mode opératoire :

- ✓ On mélange la composition d'un mortier pendant 4 minutes selon les prescriptions décrites ci-dessous et conformément à la norme :
- ✓ Introduire l'eau en premier dans la cuve du malaxeur ;Y verser ensuite le ciment ;mettre le malaxeur en marche à viteese lente .

- ✓ Après 30 s de malaxage, introduire régulièrement le sable pendant les 30 s suivant.
- ✓ Puis mettre le malaxeur pendant 1 min 30 s. Pendant les 15 premières secondes enlevé au moyen d'une raclette en caoutchouc tout le mortier adhérent aux parois et au fond du récipient en le repoussant vers le milieu de celui-ci.
- ✓ Reprendre ensuite le malaxage à grande vitesse pendant 60s.



Figure : III.14.les matériaux et les appareile utilisé

➤ **Préparation des éprouvettes :**

- ✓ La norme EN 196-1 décrit de manière détaillée le mode opératoire concernant cet essai.
- ✓ Enduire les faces latérales intérieures et le fond du moule d'une légère couche d'huile de décoffrage.
- ✓ Fixer le moule et la hausse sur la table à chocs
- ✓ Remplir le moule (4 x 4 x 16), le serrage du mortier dans ce moule est obtenu en introduisant le mortier en deux fois et en appliquant au moule 60 chocs à chaque fois.
- ✓ Ajuster la surface du moule avec la règle plate à raser
- ✓ Etiqueter les moules (date /group Tec) et couvrir la surface par une plaque de verre.

- ✓ Après 24 heures ces éprouvettes sont démoulées et entreposées dans de l'eau à $120\text{C}^{\circ}\pm 1\text{C}^{\circ}$ Jusqu'au moment de l'essai de rupture (noter l'information de l'étiquette sur les éprouvettes)
- ✓ Au jour prévu, les 3 éprouvettes sont rompues en flexion et en compression. les normes ENV 197 -1 et NFP 15-301 définissent les classes de de résistances des ciments s'après leur résistances à 2 (ou 7 jours) et 28 jours .



Figure III.15 : Agitateur d'éprouvettes (table à choc). (Labo de génie civil TIARET)



Figure III.16 : La préparation des éprouvettes de mortier (Labo de génie civil TIARET)

II.5. Caractéristiques mécaniques des éprouvettes :

Pour la détermination de la résistance à la flexion, on utilise la méthode de la charge concentrée à mi portée au moyen du dispositif de flexion normalisé. Les demi-prismes obtenus dans l'essai de flexion doivent être soumis à une force de compression sur les faces latérales de moulage sous une section de 40 mm x 40 mm x 160mm.

III.5.1. Résistance à la traction par flexion :

La machine utilisée est la machine de flexion trois points (deux appuis et un une force concentrée au milieu)

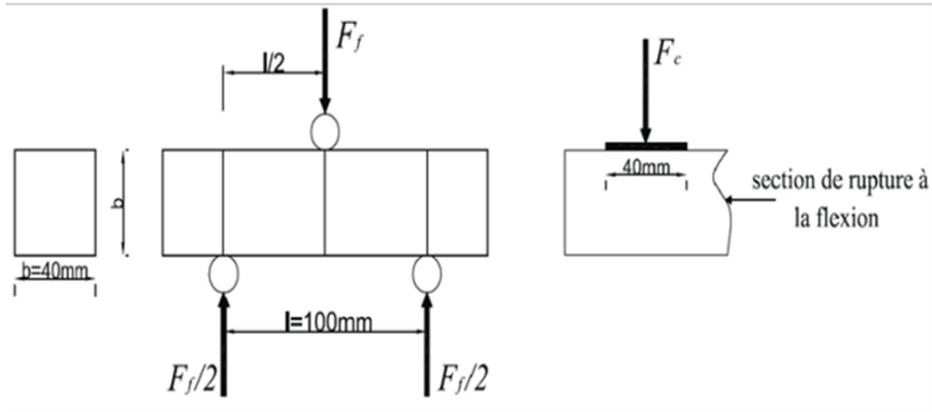


Figure III . 17 Dispositif pour l'essai de résistance à la flexion.

Si P est la charge de rupture de l'éprouvette en flexion, le moment de rupture vaut $P l/4$ et la contrainte de traction correspondante sur la face inférieure de l'éprouvette.

R_f (en N/mm²) est calculée au moyen de la formule :

$$R_f = 1.5 * P * l / b^3$$

D'où : R_f : est la résistance en flexion, en newtons par millimètre carré ou en MPa.

b : est le côté de la section carrée du prisme, en millimètres.

P : est la charge appliquée au milieu du prisme à la rupture, en newtons.

L : est la distance entre les appuis, en millimètres La machine utilisée est la machine de

flexion trois
un une force

points (deux appuis et
concentrée au milieu).



Figure III.18: machine de flexion

II.5.2. Résistance à la compression :

Les éprouvettes récupérées après essai de flexion sont sujettes encore fois à un autre essai de compression. Centrer chaque demi-prisme latéralement par rapport aux plateaux de la machine à ± 0.5 mm en utilisant le dispositif comportant la surface d'application de 4×4 cm² puis la charge sera appliquée en augmentation avec une vitesse providence jusqu'à la rupture.

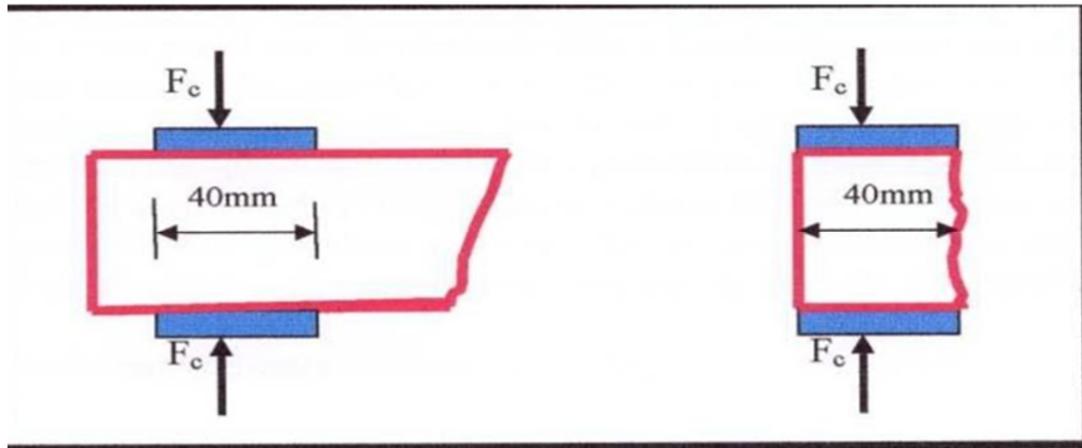


Figure III.19 Schéma type de l'essai de compression



Figure III.20 Essai de compression

La résistance en compression R_C (en N/mm²)

est calculée au moyen de la formule :

$$R_C = F_c / b^2$$

Avec :

RC : Résistance à la compression en (MPa).

FC : Charge de rupture en (N).

b : Côte de l'éprouvette est égale à 40mm

III.6 Conclusion :

Les essais d'identification présentés ci-dessus nous a permis de juger la qualité des matériaux de construction choisis pour la réalisation de ce travail expérimentale . La connaissance de différentes caractéristiques principales des matériaux (physiques, chimiques et minéralogiques) nous facilite le choix des dosages pour pouvoir fabriquer un mortier de qualité et d'une façon significative de commenter les résultats de la résistance mécanique (Compression et traction).

Chapitre IV
Interprétation des résultats

IV.1 Introduction

Les propriétés mécaniques de mortier telles que la résistance à la compression et à la traction par flexion dépendent de plusieurs facteurs : le rapport (E/C), compositions de ciment, le volume pâte/granulats et la qualité de la zone de transition pâte cimentaire granulats.

La substitution partielle d'une fraction de ciment par des matériaux pouzzolaniques engendre une modification importante de la microstructure de la matrice cimentaire, il est très important d'évaluer la contribution du matériau de substitution sur les différentes propriétés mécaniques du mortier durci.

Nous présentons dans ce chapitre les résultats des essais de résistance de compression et de traction par flexion a trois points effectués sur les mortiers confectionnés par les différents pourcentages de l'argile calcinée à 850 C° (M5%, M10%, M15%, M20%) et un mortier ordinaire avec :

M5% : Mortier incorporant 5% de l'argile calcinée.

M10% : Mortier incorporant 10% de l'argile calcinée.

M15% : Mortier incorporant 15% de l'argile calcinée.

M20% : Mortier incorporant 20% de l'argile calcinée.

Ces derniers résultats seront présentés dans des tableaux et par des histogrammes et suivi des interprétations.

IV.2 Résultats des essais

Les tableaux et l'histogramme représente les résultats de l'essai de résistance de traction par flexion a trois points et compression à 7 jours,14 jours et 28 jours de mortier avec argile calciné réaliser au niveau de laboratoire de génie civil (MDC).



Figure IV.1 : Analyse des Résultats de l'Essai de Résistance de Traction par Flexion et de Compression à 7, 14 et 28 Jours

Les tableaux IV.1 et IV.2 représentent les résultats de l'essai de résistance de compression et de traction par flexion a trois points à 7 jours de mortier confectionné par des pourcentages (5%, 10%, 15% et 20%) de l'argile calciné sous une température de 850C° et mortier ordinaire réaliser au niveau de laboratoire de génie civil (Matériaux de construction, MDC).

Tableau IV.1. Résistance de compression des mortiers (7jours)

	M.O		M .A (5%)		M .A (10%)		M .A (15%)		M .A (20%)	
	F(K N)	R(MP a)	F(KN)	R(MP a)	F(KN)	R(MP a)	F(KN)	R(MP a)	F(KN)	R(MP a)
1	1.8	1.1	2	1.2	1.84	1.16	1.55	0.97	1.40	0.77
2	1.5	0.935	1.90	1.18	1.75	1.10	1.6	1.02	1.450	0.87
3	1.75	1.10	1.95	1.2	1.75	1.10	1.35	0.82	1.40	0.80
Moy		1.14		1.19		1.12		0.93		0.81

Tableau IV.2. Résistance de traction par flexion a trois points du mortier (argile calciné) par

	MO		M.A (5%)		M.A (10%)		M.A (15%)		M.A (20%)	
	R(MP a)	F(kN)	R(MP a)	F(kN)	R(MP a)	F(kN)	R(MP a)	F(kN)	R(MPa)	F(kN)
1	25.822	41.315	30.602	48.964	28.726	45.961	22.83	36.56	16,083	25,733
	26.358	42.173	25.241	40.386	23.186	37.098	23.186	37.098	20,908	33,452
2	24,705	39.528	28.458	45.533	27.386	43.817	24.214	38.742	22,471	35,954
	23.633	37.813	23.633	37.813	21.265	34.024	23.052	36.883	20,595	32,951
3	25.688	41.101	28.905	46.247	26.224	41.959	25.420	40.672	19,702	31,523
	24.884	39.814	25.063	40.100	21.17 6	33.88 1	18.45	29.52	22,471	35,954
Moy	25,18		26.98		24.66		22.86		20,37	

flexion (7jours).

Les figures IV.2 et IV.3 représentent les résultats de l'essai de résistance de compression et de traction par flexion a trois points à 7 jours de mortier confectionné par des pourcentages (5%, 10%, 15% et 20%) de l'argile calciné sous un température de 850C° et mortier ordinaire réaliser au niveau de laboratoire de génie civil (Matériaux de construction, MDC).

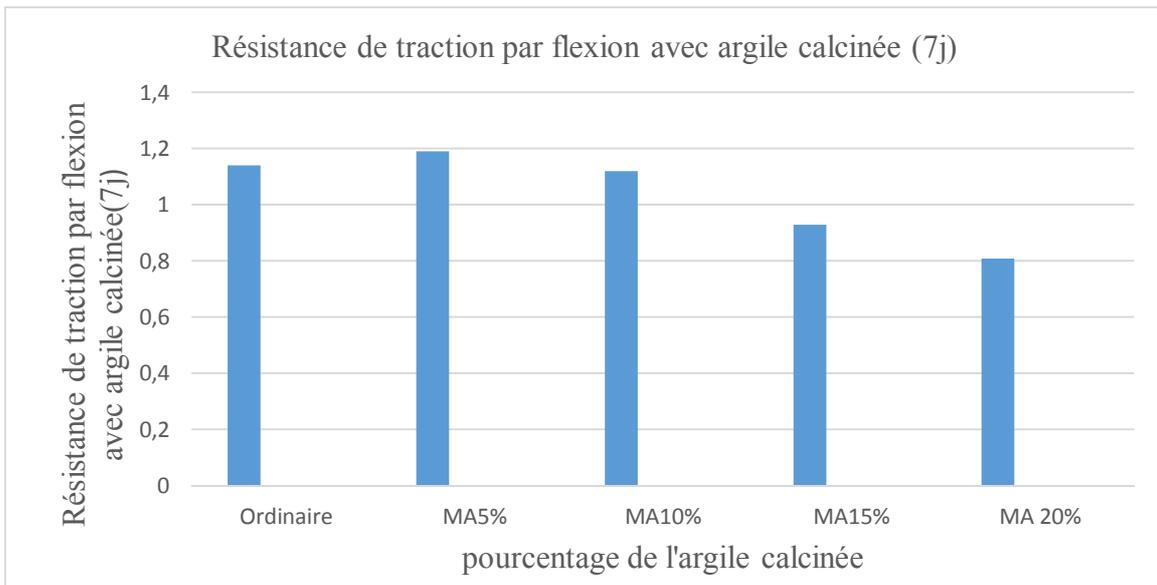


Figure IV.2 : l'effet de l'argile calcinée sur la résistance de traction par flexion (7j)

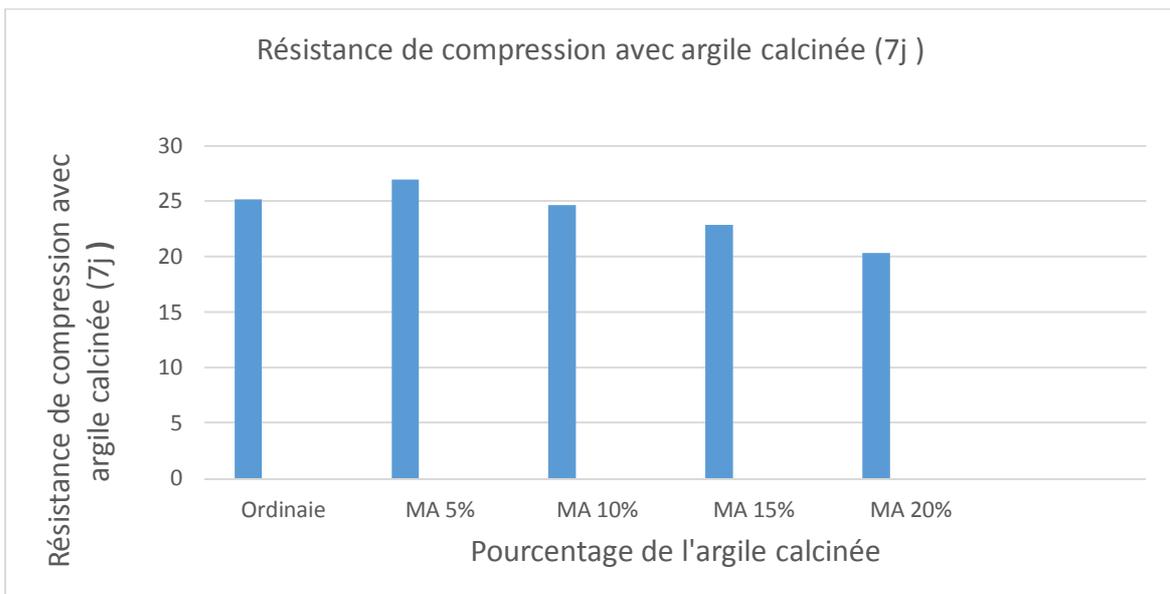


Figure IV.3 : l'effet de l'argile calcinée sur la résistance de compression(7j)

Les tableaux IV.3 et IV.4 représentent les résultats de l'essai de résistance de

compression et de traction par flexion a trois points à 14 jours de mortier confectionné par des pourcentages (5%, 10%, 15% et 20%) de l'argile calciné sous une température de 850C° et mortier ordinaire réaliser au niveau de laboratoire de génie civil (Matériaux de construction, MDC).

Tableau IV.3. Résistance de traction par flexion du mortier avec argile calciné (14j)

	M.O		M .A (5%)		M .A (10%)		M .A (15%)		M .A (20%)	
	F(KN)	R(M P)	F(K N)	R(M Pa)	F(KN)	R(M Pa)	F(KN)	R(M Pa)	F(K N)	R(MPa a)
1	2.150	1.34	2.05	1.275	2.050	1.275	1.90	1.175	2.1	1.30
2	2.100	1.32	2.7	1.65	2.150	1.325	2	1.25	1.630	1.025
3	2.150	1.32 5	2.19	1.32	2	1.25	1.85	1.15	1.950	1.22
Moy		1.32		1.41		1.28		1.19		1.18

Tableau IV.4. Résistance de compression du mortier avec argile calciné (14j)

MO		M.A (5%)		M.A (10%)		M.A (15%)		M.A (20%)	
R(MPa)	F(kN)	R(MPa)	F(kN)	R(M Pa)	F(kN)	R(M Pa)	F(kN)	R(MPa)	F(kN)
36.276	58.041	34.355	54.968	29.932	47.891	25.688	41.101	27.966	44.746
37.303	59.685	34.132	54.610	25.331	40.529	26.537	42.459	22.248	35.597
35.070	56.112	35.963	57.541	29.662	46.819	27.118	43.388	23.186	37.098
23.276	37.241	36.366	58.184	23.821	38.099	27.296	43.674	26.313	42.102
35.919	57.470	33.908	54.253	29.083	46.533	29.709	47.534	21.533	34.453
27.698	44.317	30.602	49.107	31.27	50.03	23.052	23.883	27.823	44.532
32.59		34.22		28.18		26.56		24.84	

Les figures IV.5 et IV.6 représentent les résultats de l'essai de résistance de compression et de traction par flexion a trois points à 14 jours de mortier confectionné par des pourcentages (5%, 10%, 15% et 20%) de l'argile calciné sous une température de 850C° et mortier ordinaire

réaliser au niveau de laboratoire de génie civil (Matériaux de construction, MDC).

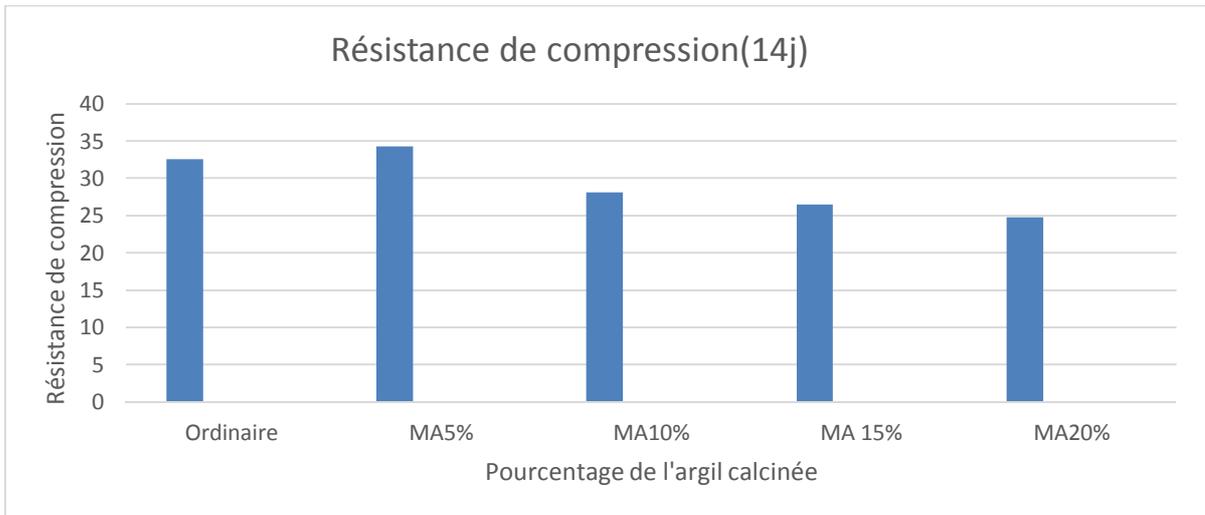


Figure IV.4: l'effet de l'argile calcinée sur la résistance de compression(14j)

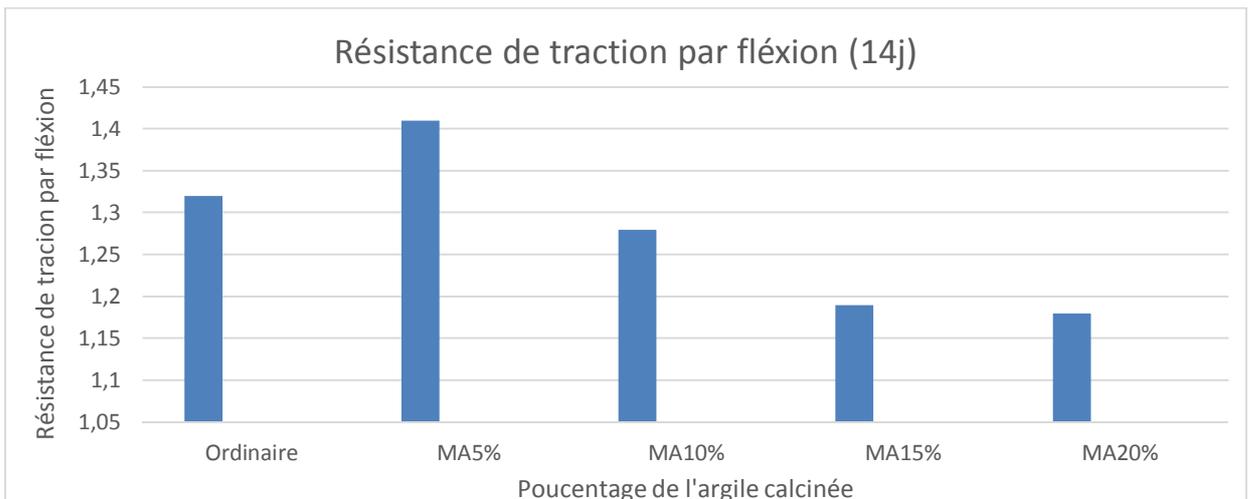


Figure IV. 5: l'effet de l'argile calcinée sur la résistance de traction par flexion (14j)

Les tableaux IV.5 et IV.6 représentent les résultats de l'essai de résistance de compression et de traction par flexion a trois points à 28 jours de mortier confectionné par des pourcentages (5%, 10%, 15% et 20%) de l'argile calciné sous une température de 850C° et mortier ordinaire réaliser au niveau de laboratoire de génie civil (Matériaux de construction, MDC).

Tableau IV.5.Résistance de compression du mortier avec argile calciné (28j)

	M.O		M .A (5%)		M .A (10%)		M .A (15%)		M .A (20%)	
	F(K N)	R(M Pa)	F(KN)	R(M Pa)	F(KN)	R(M Pa)	F(KN)	R(M Pa)	F(K N)	R(M Pa)
1	2	1,25	2.4	1.5	1.850	1.15	2	1.25	2.125	1.32
2	2.15	1,30	2.1	1.30	2.20	1.38	1.850	1.15	1.725	1.12
3	2.25	1,40	2.150	1.32	2	1.25	2.05	1.27	1.950	1.20
Moy		1.31		1.37		1.26		1.22		1.21

Tableau IV.6.Résistance de compression de mortier avec argile calciné (28j)

	MO		M.A (5%)		M.A (10%)		M.A (15%)		M.A (20%)	
	R(MPa)	F(kN)								
1	37.929	60.686	42.128	67.405	36.063	58.65	27.922	44.675	28.592	45.747
	38.465	61.544	40.743	65.189	36.067	52.615	31.272	50.036	22.159	35.454
2	38.376	61.401	39.046	62.273	35.204	56.326	29.932	47.891	31.004	49.607
	38.108	60.972	40.565	64.904	39.629	62.831	32.345	51.781	32.613	52.180
3	29.039	46.462	37.393	59.828	30.654	49.246	29.128	46.605	34.757	55.611
	36.00	57.61	41.771	66.833	37.16	59.47	33.327	53.324	34.578	55.325
Moy	36.32		40.27		35.80		30.65		30.61	

Les figures IV.7 et IV.8 représentent les résultats de l’essai de résistance de compression et de traction par flexion a trois points à 28 jours de mortier confectionné par des pourcentages (5%, 10%, 15% et 20%) de l’argile calciné sous un température de 850C° et mortier ordinaire réaliser au niveau de laboratoire de génie civil (Matériaux de construction, MDC).

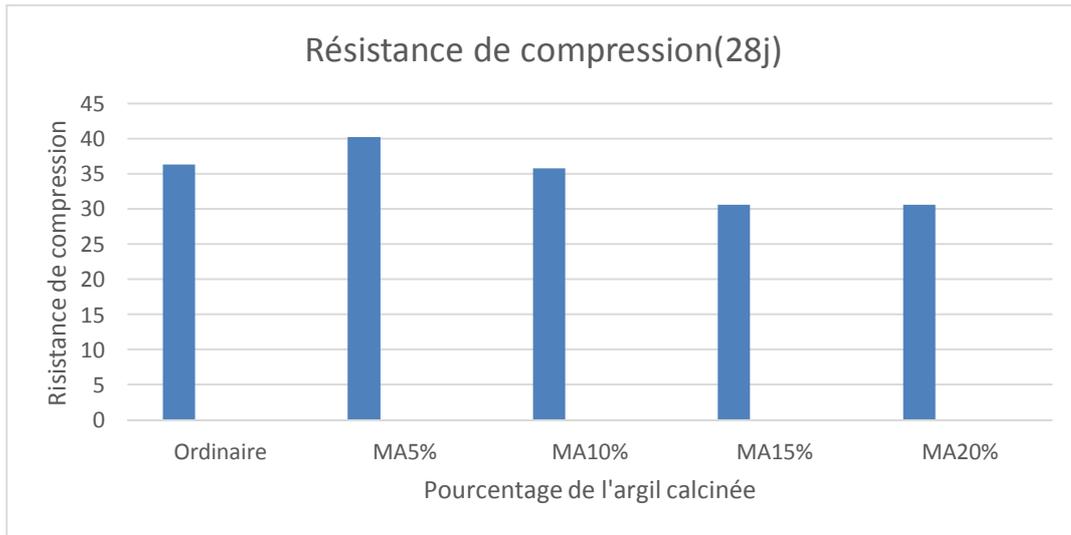


Figure IV.6: l’effet de l’argile calcinée sur la résistance de compression (28j)

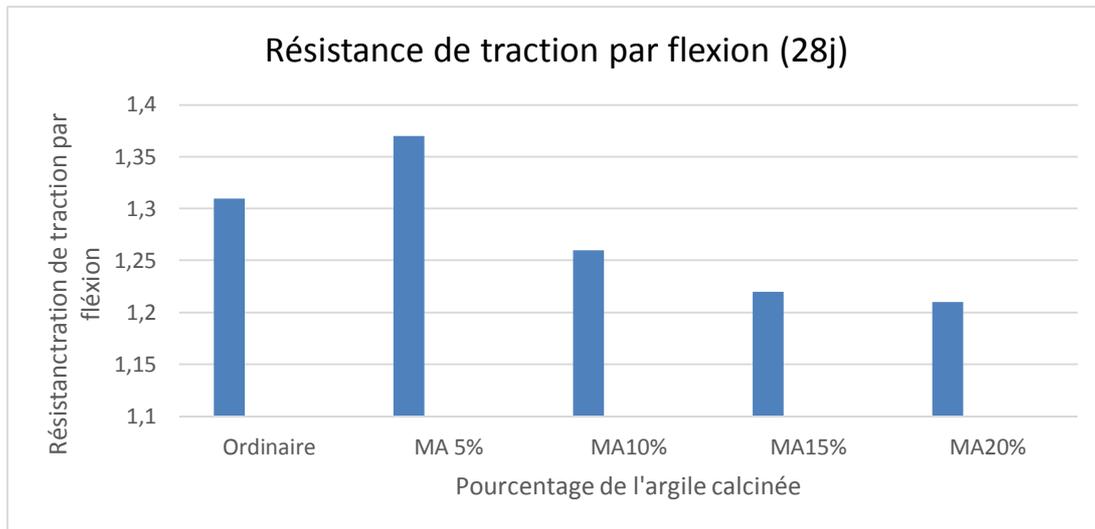


Figure IV.7: l’effet de l’argile calcinée

sur la résistance de traction par flexion (28j)

À 7, 14 et 28 jours, nous pouvons observer que les mortiers contenant de l’argile calciné a 5% présentent des résistances à la compression légèrement supérieures à celles du mortier témoin et cela dépend de trois effets principaux pour lesquels le matériaux de substitution contribuera d’améliorée la résistance : l’effet pouzzolanique qui dépend essentiellement de la réactivité de l’argile, l’effet filler et effet accélérateur, qui est l’effet physique, qui tend à accélérer la vitesse d’hydratation du ciment Wild.S et Khatib [15]. En effet, la présence des particules fines tend souvent d’augmenté le nombre de sites de nucléation et précipitation d’hydrates tels que C-S-H, C-A-H, C-A-S-H.

La formation des nouveaux hydrates supplémentaires contribué à la densification de

la matrice cimentaire et par conséquent a l'amélioration des propriétés mécaniques. Wild et al. [15] ont conclu qu'il y a trois facteurs élémentaires pour laquelle les matériaux pouzzolaniques contribue à la résistance du béton lorsqu'il partiellement remplace le ciment dans le mortier : l'effet de filler, l'effet d'accélération de l'hydratation du ciment et la réaction pouzzolanique. Selon ces auteurs., L'effet de filler est immédiat, l'accélération de l'hydratation du ciment portland a un impact maximum dans les premières 24 heures, et la réaction pouzzolanique apporte la plus grande contribution à la résistance entre 7 et 14 jours. Wild et al a également conclu que la contribution positive ces matériaux ne se poursuit pas au-delà de 14 jours, quel que soit le niveau de remplacement.

IV.3 Conclusion :

À partir des résultats d'essais effectués sur le mortier durci incorporant différents taux du l'argile calcinée à une température de 850 C° (M5%, M10 %, M15% et M20%), On a remarqué que les résultats de cette étude ont montré que l'incorporation de ce nouveau matière contribué légèrement a l'augmentation de la résistance à la compression lorsqu'il est utilisé à 15 % et 20% a 7 jours et 5% dans l'Age de 14j et 28 jours, et qui dépend essentiellement de leur taux d'incorporation, et l'âge de réalisation de l'essai c

Conclusion générale

Conclusion générale

L'objectif de ce travail. Nous avons voulu exploiter l'argile calcinée comme un ajout à caractère pouzzolanique pour produire un éco-ciment. L'incorporation du matériau à l'avantage de réduire les émissions de CO₂ occasionnées par la fabrication du ciment, d'où l'aspect environnemental de la recherche.

L'amélioration de la résistance à court terme est liée principalement à l'effet de l'accélération d'hydratation de ciment et à l'effet filler de matériaux pouzzolanique (Wild.S et Khatib).

En effet, la présence des particules fines tend souvent d'augmenté le nombre de sites de nucléation qui former des nouveaux hydrates qui sont améliorera la propriété mécanique. Les meilleures résistances ont été obtenues avec le pourcentage de substitution de 5% de l'argile calciné par rapport la masse du ciment.

À partir des résultats d'essais effectués sur le mortier durci incorporant différents taux du l'argile calciné a une température de 850 C° (M5%, M10 %, M15% et M20%), On a remarqué que les résultats de cette étude ont montré que l'incorporation de ce nouveau matériau contribué légèrement à l'augmentation de la résistance à la compression lorsqu'il est utilisé à 5% dans l'age de 7j, 14j et 28 jours, et qui dépend essentiellement de leur taux d'incorporation, et l'âge de réalisation de l'essai compression ainsi leur préparation (post calcination).

On remarque que la résistance des essais mécaniques sont satisfaisants on peut dire que l'argile calcinée qu'on a utilisée a une avantage sur l'amélioration des propriétés mécaniques.

Références bibliographiques

Références

[1] <http://rocaille.fr/lexique-et-historique/le-mortier>.

[2] les morties .pdf elearning -facst.univ-annaba.dz.

[3] **Dr.Benhouria**, Réalisée par DAHOU Fatma Zohra et Encadré par l'influence de la surface spécifique du Baline sur le ciment "Rapport de la surface du Blaine sur le ciment". 2017/2018

[4] **Biodégradation** De l'université D'Economie et des sciences D'aix -Marseille. JESTIN, Aurélie. 4 mai 2005.

[5] **Directeur de thèse Mezghiche bouzidi** .Etude des propriétés physico-mécanique et rhéologie des béton à base des sables de carrières :expérimentation et modélisation. 29 Mai 2016.

[6] **Meriem, LAAKRI. thèse de doctorat EN sciences** . 17/02/2020. 2.

[7] **windet**, Soutenue par Philipines LALAN et Dirigée par Laurnt De. 11. THèse de doctorat l'université de recherche paris Sciences et Lettre "Influences d'une température de 70 degré C sur

[8] **Abdelkader, BELGHIT**. Thèse de doctorat Durabilité des mortiers à base de déchets naturels. 15/12/2022.

[9] **Febelcem** Rapport environnementale de l'industrie cimentaire belge . 2006.

[10] **Febelcem**, « Contribution de l'industrie du ciment à la réduction des émissions de CO2 », 2007.

[11] **Syndicat français de l'industrie du ciment**, « L'industrie cimentière, Exemple à suivre » Economie circulaire et COP21, Novembre 2015.

[12] les types de mortie [https:// www.distriatisan.fr](https://www.distriatisan.fr)

[13] **kenza, présenter par: mokrani ilhem** et geloul. Etude d'un mortier avec ajout grigns d'olives comme substitution au sabk.

[14] **les types de mortie** [https:// www.distriatisan.fr](https://www.distriatisan.fr)

[15] **NADIA, BENSID.** THèse Elaboration des matériaux organo-inorganiques à base de produit naturels et leurs applications dans des processus chimique Université de Annaba UES. 16.

[16] [https://monde naturel .ca/toutes-les couleurs -de -l'argile/](https://monde-naturel.com/toutes-les-couleurs-de-largile/)

[17] **tahari, Nadia.** réactivité d'argile modifiée par polymérisation ; Etude de l'adsorption des polluants des eaux usées. s.l. : 20.

[18] **khemkhem, Sabeur.** Elaboration de membranes de microfiltration ERT d'ultrafiltration EN D"argile Tunusien. 9 Févrie 2005.

[19] mémoire Effet des ajouts à base d'argiles gréseuse et viseuse sur les propriété des matériaux cimentaires. Kamel, Chikouche Mohamed Aziz le président Aït Tahar. 2007/2008.

[20] **Abakar, ALI.** thèse de Doctorat .caractéristique mécaniques et thermiques de l'argile stabilisée par la gamme arabique etrenforcé la paille de riz. 2018.

[21][https://civil today .com](https://civiltoday.com)