

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université A. M. OULHADJ - Bouira
Faculté des Sciences et des Sciences Appliquées
Département de Génie des Procédés



Mémoire

Réalisé par

KHALDI Asma
SAAD Maroua

Pour l'obtention du diplôme de

MASTER

Filière : Génie des Procédés

Spécialité : Génie Chimique

**Optimisation du processus de production de
ciment pour améliorer son rendement et réduire
son impact environnemental**

Soutenu le 28/06/2025

Devant le jury :

M ^{me} . ZIANI	Salima	Professeur	UAMO	Présidente
M. AOUDJIT	Farid	MCA	UAMO	Examineur
M. SAHNOUNE	Mohamed	MCA	UAMO	Encadrant

Année Universitaire : 2024/2025

Remerciements :

Ce travail a été réalisé au sein de l'entreprise de la Cimenterie de Sour El Ghoulane, située dans la wilaya de Bouira, sous la direction de Monsieur SAHNOUNE Mohamed. Qu'il trouve ici l'expression de notre profonde gratitude pour la confiance qu'il nous a accordée en nous permettant de mener à bien cette recherche. C'est grâce à son encadrement que nous avons pu découvrir le monde de la recherche scientifique et vivre une expérience enrichissante, tant sur le plan intellectuel qu'humain. Nous lui sommes très reconnaissants pour sa méthode rigoureuse, son écoute attentive et son soutien moral tout au long de cette aventure.

Nous adressons également nos sincères remerciements à tous les responsables de l'entreprise Cimenterie de Sour El Ghoulane, et plus particulièrement à Madame Kassi Anissa, pour son aide précieuse et sa disponibilité.

Nos remerciements vont également à Monsieur AOUDJIT Farid, Maître de Conférences Classe A à l'Université de Bouira, pour l'intérêt qu'il a porté à notre travail en acceptant de l'examiner.

Nous exprimons notre profonde reconnaissance à Madame ZIANI Salima, Professeur à l'Université de Bouira, pour avoir accepté de présider notre soutenance. Sa présence et son regard critique ont grandement enrichi notre démarche.

Nous remercions chaleureusement l'ensemble des enseignants de la Faculté des Sciences Appliquées pour leur enseignement, leur accompagnement et leurs encouragements constants qui nous ont permis de développer nos compétences et notre curiosité scientifique. Enfin, nous exprimons toute notre gratitude à l'équipe administrative de la Faculté des Sciences Appliquées pour leur bienveillance, leur soutien logistique et leur grande amabilité tout au long de notre parcours.

Dédicace

Je dédie ce travail à :

- Ma famille, avec toute ma profonde gratitude et un immense amour.
- À mes très chers parents, à qui j'adresse ma sincère reconnaissance pour leur soutien moral constant et leurs encouragements tout au long de mes études. Même dans les moments les plus difficiles, ils ont toujours été là, présents, patients et bienveillants. Que Dieu les protège. Je leur serai éternellement reconnaissant.
- À mes chères sœurs, Chaima et Hadjer, ainsi qu'à mon cher frère Hamza, pour leur affection, leur compréhension et leur présence précieuse à mes côtés.
- À mes très chères amies Amani, Rania et Oumaima, pour leur soutien, leur amitié fidèle et les moments de joie partagés. Merci d'avoir toujours été là, avec vos encouragements, vos conseils et votre bonne humeur, qui ont su alléger les moments de fatigue et de doute.
- À mon binôme Maroua.
- À mon grand-père Kouider (رحمه الله), que Dieu lui accorde Sa miséricorde. Il reste dans mon cœur et mes pensées, et je lui dédie humblement ce travail.
- Et à tous ceux que je n'ai pas cités, mais qui ont, d'une manière ou d'une autre, contribué à mon parcours : je ne vous oublie pas, merci du fond du cœur.

Khaldi Asma

Dédicace

Je dédie ce travail à :

- ✓ Mes très chers parents :ma mère, et mon père (Allah yerhamou), qui ont toujours été là pour moi, et qui m'ont donné un magnifique exemple de labeur et de persévérance.
Merci pour leur attention, leurs sacrifices et leur soutien tout au long de mes études.
- ✓ À mon cher encadrant, M. Sahnoune.
- ✓ À mes chers frères : Mohamed, Yousef, Younes, Abd El Kerim.
- ✓ À mes chères sœurs : Amina, Khadidja, Aziza, Warda, Rahima.
- ✓ À ma chère binôme Asma, ainsi qu'à toute sa famille.
- ✓ À mes chères amies de l'université.
- ✓ Et à tous ceux qui m'aiment.

Saad Maroua

LISTE DES ABRÉVIATIONS :

ASTM: American Society for Testing and Materials.

C2A : Aluminate tricalcique (célite).

C2S : Silicate dicalcique (bélite).

C3S : Silicate tricalcique (Alite).

C4AF : Alumino-ferrite- tétracalcique (ferrite).

C/S : Rapport moyen calcium/silicium.

DRX : Diffraction des rayons X.

E/C : Rapport Eau/Ciment.

Fc : Résistance à la compression.

GICA : Groupe Industriel des Ciments d'Algérie.

NA : Norme algérienne.

O : Couche octaédrique.

PAF : Perte au feu.

R : Rapide.

SC-SEG : La Société des Ciments de Sour El Ghoulane.

SNMC : Société Nationale des Matériaux de Construction.

SPA : Société par actions.

SSB : Surface spécifique Blaine.

T : Couche tétraédrique.

XRF : Spectrométrie à fluorescence X.

LISTE DES TABLEAUX :

Tableau I.1 : Composition en oxydes de clinker.

Tableau I.2 : Les compositions minéralogiques de clinker.

Tableau I.3 : Classification en fonction de la composition.

Tableau I.4 : Classification en fonction de la résistance.

Tableau I.5 : Classification des phyllosilicates.

Tableau II.1 : Composition chimique de clinker.

Tableau II.2 : Composition minéralogique de clinker.

Tableau II.3 : Composition chimique de gypse.

Tableau II.4 : Composition chimique de l'argile brut.

Tableau II.5 : Composition chimique de l'argile calcinée.

Tableau II.6 : Composition chimique de calcaire.

Tableau II.7: Les pourcentages des constituants de ciment.

Tableau II.8: Composition chimique de ciment SARIE.

Tableau II.9: Composition physique de ciment SARIE.

Tableau III.1 : Composition chimique des variantes.

Tableau III.2 : Les modules chimiques.

Tableau III.3 : Composition physique des variantes.

Tableau III.4 : Résistance de flexion du mortier.

Tableau III.5 : Résistance de compression du mortier.

LISTE DES FIGURES :

Figure I.1 : Les constituants des ciments.

Figure I.2 : Nodules de clinker.

Figure I.3 : Micrographie de clinker.

Figure I.4: Schéma récapitulant le processus de fabrication de ciment.

Figure I.5 : Un four rotatif.

Figure I.6 : Apparition des produits de la clinkérisation.

Figure I.7 : Schéma d'un broyeur à boulets rotatif.

Figure I.8 : Représentation d'un tétraèdre de silice (a)et (b) agencement de tétraèdres en couche tétraédrique.

Figure I.9 : Représentation d'un octaèdre de silice (a) et (b) agencement d'octaèdres en couche octaédrique.

Figure I.10 : Représentation des empilements de tétraèdres siliceux et d'octaèdres alumineux (cas de la kaolinite).

Figure I.11 : Représentation schématique des empilements de tétraèdres siliceux et d'octaèdres.

Figure II.1 : Appareil AXRD.

Figure II.2 : Constituants de ciment SARIE.

Figure II.3 : Appareil VITRIOX GAS.

Figure II.4 : Perle.

Figure II.5 : Spectromètre à fluorescence X (XRF).

Figure II.6 : Appareil de VICAT.

Figure II.7 : Appareil de prise de temps.

Figure II.8 : Appareil de Perméabilité.

Figure II.9 : Essai de Flexion.

Figure II.10 : Essai de compression.

Figure II.11 : Chambre de conservation par l'eau.

Figure III.1 : Diffractomètre DRX de l'argile calcinée.

Figure III.2 : Diffractomètre DRX de clinker.

Figure III.3 : Diffractomètre DRX des variantes.

Figure III.4 : Les éprouvettes conservées.

Figure III.5 : Effet de l'argile calcinée sur la résistance de flexion des différentes formulations.

Figure III.6 : Effet de l'argile calcinée sur la résistance de compression des différentes formulations.

Sommaire

Introduction générale	1
------------------------------------	----------

CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

I.1. Historique	3
I.2. Le ciment	4
I.2.1. Définition	4
I.2.2. Composition	5
I.2.2.1. Clinker	5
I.2.2.2. Le gypse	8
I.2.2.3. Les ajouts	9
I.2.2.3.1. Les ajouts actifs	9
I.2.2.3.2. Les ajouts inertes	11
I.2.3. Hydratation de ciment	12
I.2.3.1. Hydratation des silices de calcium (C3S/C2S)	12
I.2.3.2. Hydratation des aluminés (C3A/C4AF)	13
I.2.4. Fabrication de ciment.....	14
I.2.4.1. Clinkérisation.....	14
I.2.4.2. Broyage.....	16
I.2.5. Classification de ciment.....	17
I.2.5.1. Classification en fonction de la composition	17
I.2.5.2. Classification en fonction de la résistance	18
I.2.6. Propriétés de ciment	19
I.2.6.1. La résistance mécanique	19

I.2.6.2. La consistance normale.....	20
I.2.6.3. La prise de ciment.....	20
I.3. Argile calcinée	21
I.3.1. Définition	21
I.3.2. Classification	21
I.3.2.1. Les minéraux de type 1 :1 (TO) 7 Å.....	22
I.3.2.2. Les minéraux de type 2 :1 (TOT) 10 Å	23
I.3.2.3. Les minéraux de type 2 :1 :1 (TOTO) 14 Å	24
I.3.3. Caractéristiques.....	24
I.3.3.1. La surface spécifique	24
I.3.3.2. Le pouvoir de gonflement et l'adsorption de l'eau	25
I.3.3.3. Echange de cations	25
I.3.4. Mode d'obtention	25

CHAPITRE II : MATERIELS ET METHODES

II.1. Présentation de société	27
II.2. Préparation de l'échantillon	28
II.2.1. Les matériaux utilisés	28
II.2.1.1. Clinker	28
II.2.1.2. Gypse.....	28
II.2.1.3. Argile	29
II.2.1.3.1. Argile brute	29
II.2.1.3.2. Argile calcinée	29
II.2.1.3.2.1. Les analyse minéralogique DRX	29

II.2.1.4. Calcaire	30
II.2.2. Méthode de préparation des échantillon.....	30
II.2.3. Ciment SARIE (Témoin).....	31
II.3. Caractéristiques des échantillons.....	32
II.3.1. Caractéristiques chimiques	32
II.3.1.1. Perte au feu (PAF)	32
II.3.1.2. Perle fondue	33
II.3.2. Caractéristiques physiques	35
II.3.2.1. Essai de prise	35
II.3.2.2. Finesse de Blaine	37
II.3.3. Caractéristiques mécaniques	38
II.3.3.1. Les mortiers	39

CHAPITRE III : RESULTATS ET DISCUSSION

III.1. Caractéristiques chimiques (Analyse XRF)	41
III.2. Analyses minéralogiques par DRX.....	43
III.3. Caractéristiques physiques	45
III.4. Caractéristiques mécaniques	46
III.4.1. Résistances à la flexion	47
III.4.2. Résistances à la compression	48
Conclusion générale	51

Références bibliographiques

INTRODUCTION GENERALE

L'industrie du ciment joue un rôle crucial dans le développement des infrastructures actuelles. Toutefois, elle est aussi perçue comme l'une des principales sources d'émissions de gaz à effet de serre, notamment de dioxyde de carbone (CO_2). La production de ciment Portland, actuellement la plus répandue, est largement basée sur la fabrication du clinker, un processus consommateur d'énergie qui génère d'importantes émissions de CO_2 . Celles-ci proviennent à la fois de la décarbonatation du calcaire et de la combustion des combustibles fossiles.

Avec les défis écologiques et économiques actuels, il est devenu indispensable d'optimiser les processus de production du ciment. Il ne suffit plus de simplement d'améliorer la productivité, il est également nécessaire de revoir les formulations et les phases du processus afin de minimiser l'impact environnemental du produit final. Les études récentes sur les liants alternatifs s'inscrivent dans cette perspective, en particulier celles qui cherchent à substituer partiellement le clinker par des matériaux secondaires ou naturels ayant un faible impact environnemental.

Dans cette approche, l'argile calcinée est considérée comme l'un des matériaux les plus prometteurs. Suite à un traitement thermique approprié, certaines argiles, comme les kaolinites, gagnent en réactivité et peuvent remplacer partiellement le clinker dans la composition du ciment. Associées à du calcaire finement pulvérisé, elles favorisent la fabrication d'un ciment innovant, moins énergivore et limitant jusqu'à 40 % les émissions de CO_2 en comparaison au ciment Portland traditionnel. Cette méthode, désignée sous l'appellation LC^3 (Limestone Calcined Clay Cement), offre aussi des bénéfices techniques, particulièrement en ce qui concerne la durabilité.

Toutefois, l'intégration de l'argile calcinée dans le processus de production du ciment entraîne de nouvelles exigences industrielles. L'efficacité du processus repose sur une série de facteurs qui méritent d'être perfectionnés : conditions de calcination, dosage des composants, consommation énergétique, ajustement des installations, etc.

L'objectif de cette étude est d'explorer les manières d'optimiser la production de ciment à partir d'argile calcinée pour en augmenter l'efficacité tout en réduisant son empreinte environnementale.

Le premier chapitre propose une synthèse bibliographique qui couvre les aspects majeurs du ciment, y compris sa définition, sa composition, son processus de production, sa catégorisation et ses caractéristiques. Il traite aussi de l'argile calcinée, en discutant de ses

propriétés, de son processus de fabrication et de sa capacité à servir partiellement comme alternative au clinker.

Le deuxième chapitre expose la méthodologie expérimentale utilisée pour évaluer les performances du ciment à base d'argile calcinée.

Le troisième chapitre détaille les résultats obtenus et leur analyse. Il souligne l'impact de l'intégration de l'argile calcinée sur les caractéristiques du ciment.

Cette recherche vise à encourager l'utilisation de matériaux de construction plus écologiques, tout en satisfaisant les normes de performance du domaine. Dans ce contexte, de nombreuses perspectives se présentent. Il serait judicieux de poursuivre les études sur la valorisation des argiles locales ou résiduelles afin de promouvoir l'approvisionnement local et minimiser les coûts écologiques associés au transport. Par ailleurs, l'optimisation des technologies de calcination, notamment grâce à l'utilisation d'énergies renouvelables ou de méthodes moins énergivores, constitue un moyen essentiel pour réduire davantage les émissions associées à la production. Il est également nécessaire d'évaluer la durabilité à long terme du ciment LC³ dans des conditions d'exposition réelles. En définitive, il serait crucial de réfléchir à l'intégration normative de ces ciments et à leur adoption graduelle par l'industrie, une démarche qui pourrait être facilitée par des politiques encourageantes pour assurer leur mise en œuvre à grande échelle.

CHAPITRE I
ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

Ce premier chapitre portera sur une étude bibliographique sur le ciment et l'argile. Elle abordera la composition et la classification du ciment ainsi que les moyens de sa production. Concernant l'argile, on verra leur définition et classification principalement.

I.1. Historique :

L'anglais Joseph Aspdín, fut l'auteur du brevet du 21 octobre 1824 qui a donné son nom au ciment Portland. Ce nom fait référence à une couleur semblable à celle de la pierre de Portland et désigne un mélange minutieux de chaux et d'argile broyées, dans des proportions déterminées de manière empirique, chauffé à une température élevée puis réduit en poudre. Ce procédé permettait d'obtenir un agglomérat hydraulique dont la solidité était accrue par le processus de durcissement. [1]

Au cours des dernières décennies, l'industrie du ciment en Algérie a subi une métamorphose impressionnante, évoluant d'une situation de dépendance vis-à-vis des importations à une place prépondérante régionale en matière de production et d'exportation. Ce progrès dénote une politique nationale visant à promouvoir les ressources locales et atteindre l'autosuffisance économique. L'industrie du ciment en Algérie a connu un début modeste avec des installations qui ont été transmises de la période coloniale. Jusqu'à la nationalisation en 1967, des opérateurs étrangers ont géré les premières cimenteries, comme celles situées à Meftah, Zahana et Raïs Hamidou. Ce virage a marqué l'établissement de la Société Nationale des Matériaux de Construction (SNMC), qui a lancé un ample programme de modernisation et d'instauration de nouvelles lignes de production. Entre 1967 et 1983, la production nationale a été considérablement augmentée, passant à une capacité globale de 10 millions de tonnes par an grâce à l'adoption de technologies de pointe et à l'expansion des infrastructures.

La véritable transformation a eu lieu vers 2010, avec l'apparition de grands acteurs comme le Groupe Industriel des Ciments d'Algérie (GICA) et des entreprises privées telles que Lafarge Holcim Algérie. Ces sociétés ont modernisé leurs lignes de production et intégré des innovations, ce qui permet à l'Algérie de satisfaire la demande locale tout en diminuant les importations. En 2019, on a constaté une hausse significative des exportations de ciment, qui ont grimpé de 275 % en termes de valeur, pour s'établir à 60,68 millions de dollars. Cette dynamique a pris de l'ampleur, notamment avec l'interdiction d'importer des matériaux disponibles sur place imposée en 2020. Cette stratégie a permis de dépasser les 39 millions de tonnes en production nationale en 2022, largement supérieur aux besoins prévus qui étaient estimés à 21 millions de tonnes.

Actuellement, l'Algérie se classe au rang de deuxième exportateur mondial de clinker, générant des recettes de 438,48 millions de dollars, et figure parmi les principaux pourvoyeurs de ciment hydraulique pour l'Union Européenne. Grâce à la compétitivité des produits algériens, l'accès aux marchés africains, européens et américains est désormais possible. En 2023, les exportations totales de matériaux de construction ont grimpé à 1,2 milliard de dollars, renforçant ainsi la position prédominante de l'Algérie dans ce domaine. [2]

I.2. Le Ciment :

I.2.1. Définition :

Il s'agit d'un agent liant hydraulique, se présentant comme une poudre minérale fine dérivée du calcaire et de l'argile. La transformation de ces composants par broyage et cuisson à des températures extrêmes (jusqu'à 1450°C) donne lieu à une roche synthétique connue sous le nom de clinker. On y ajoute ensuite du gypse (~5%) ainsi que d'autres éléments secondaires (< 5%), qui s'hydratent au contact de l'eau. Il crée donc une pâte qui s'installe et qui se durcit progressivement. Dès que le ciment entre en contact avec l'eau, une série de réactions chimiques se produisent. Un revêtement d'hydrates se forme sur la surface des particules de ciment. Ces réactions se produisent initialement à un rythme plus lent durant une phase dite de dormance, avant de s'intensifier pendant la phase de prise. C'est l'élément essentiel du béton, car il permet de transformer un mélange non cohérent en une substance solide. On trouve sur le marché divers types de ciments, chacun ayant des caractéristiques distinctes en lien avec les propriétés du béton. Par conséquent, la sélection du type de ciment et sa proportion sont dictées à la fois par les performances attendues (résistance mécanique, résistance aux éléments agressifs) et par les caractéristiques des autres constituants. [3][4]



Figure I.1 : Les constituants des ciments. [5]

I.2.2. Composition :

Le ciment se compose de différents constituants parmi lesquels le principal s'avère être le clinker.

I.2.2.1. Clinker :

Le clinker est généré à partir d'un assemblage d'éléments minéraux (principalement des argiles et des roches calcaires broyées), appelé le cru, qui est introduit dans un four rotatif. C'est là que se produisent les réactions menant à la formation des silicates de calcium. Le plus remarquable est la décarbonatation du calcaire dont le CO_2 est un sous-produit. La fabrication du clinker génère donc deux sources de CO_2 : par l'emploi de différents combustibles pour la chauffe du four, et par le biais de cette réaction chimique de décarbonatation. Une fois sorti du four, le produit apparaît sous la forme de nodules de taille centimétrique. [6]

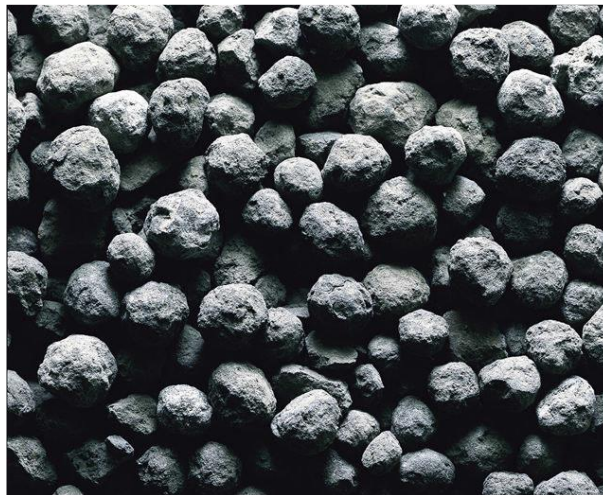


Figure I.2 : Nodules de clinker. [7]

- Composition chimique :

Le clinker est un module solide composé de chaux (CaO), des silice (SiO_2), d'alumine (Al_2O_3) et de ferrite (Fe_2O_3). La composition chimique du clinker formulé doit se conformer à des critères spécifiques [8], tels que décrits dans le Tableau (I.1) :

Tableau I.1 : Composition en oxydes de clinker. [8]

Oxydes	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	K ₂ O+Na ₂ O	SO ₃
Teneur limite %	62-67	19-25	3-8	2-5	0.5-2	0.5-1.2	1-3

Chaux : Il s'agit de l'oxyde ou de l'hydroxyde de calcium CaO . Pour la formation de silicates et d'aluminates de calcium, une quantité suffisante de chaux est indispensable. Un déficit en chaux

diminue la solidité du ciment. Un manque de chaux conduit à une prise rapide du ciment. Une surabondance de chaux rend le ciment instable ; ce qui conduit à l'expansion et à la décomposition du ciment. [9]

Silice : Le silice est aussi appelé dioxyde de silicium, avec la formule chimique SiO_2 . Pour obtenir du silicate dicalcique et tricalcique, la présence d'une quantité adéquate de silice dans le ciment est nécessaire. Le ciment gagne en résistance grâce à la silice. La silice est habituellement présente dans une proportion approximative de 30 % dans le ciment. [9]

Alumine : Il s'agit de l'oxyde d'aluminium. Sa composition chimique se résume à Al_2O_3 . Le ciment acquiert une caractéristique de prise rapide grâce à l'alumine. La présence de la quantité nécessaire d'alumine diminue la température de clinkérisation alors qu'une surabondance affaiblit le ciment. [9]

Oxyde de fer : formule chimique : Fe_2O_3 . L'oxyde de fer donne de la couleur au ciment. Il agit comme un fondant. À très haute température, il réagit chimiquement avec le calcium et l'aluminium pour former de la ferrite tricalcique-alumineuse. Il confère dureté et résistance au ciment. [9]

Les autres composants mineurs les plus significatifs Il s'agit de : MgO , Na_2O , K_2O et SO_3 , qui peuvent jouer un rôle crucial dans les caractéristiques des ciments. Le MgO , ou oxyde de magnésium, est dérivé de la dolomite, qui se trouve fréquemment aux côtés du calcaire et ne doit pas excéder 5.0% en poids. Les oxydes alcalins K_2O et Na_2O sont généralement issus de l'argile et des feldspaths ; ils ont une grande importance dans les réactions de décomposition du béton (réactions sulfatique et alcali-granulat, respectivement). L'anhydride sulfurique SO_3 est issu de la pyrite FeS_2 , du calcaire ou de l'argile, et principalement des matières combustibles utilisées comme le charbon, le fioul ou le gaz naturel. [10] [11]

- Composition minéralogique :

La cuisson des oxydes à une température de 1450°C dans le four entraîne la création des quatre phases anhydres phase indiquées dans le Tableau (I.2) : [10]

Tableau I.2 : Les compositions minéralogiques de clinker. [10]

Phase minéralogique	Formule	Notation simplifiée	Pourcentage (%)
Silicate tricalcique (Alite)	$3\text{CaO}.\text{SiO}_2$	C3S	50-75
Silicate dicalcique (bélite)	$2\text{CaO}.\text{SiO}_2$	C2S	10-30
Aluminate tricalcique (célite)	$3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$	C2A	2-15
Alumino-ferrite- tétracalcique (ferrite)	$4\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{Fe}_2\text{O}_3$	C4AF	5-15

- Silicate tricalcique (Alite) :

Le silice tricalcique C3S, est le plus important en termes de poids et de réactivité dans les caractéristiques du clinker, notamment son progrès en matière de résistance et de quantité. Son hydratation passe par des processus de dissolution et de précipitation, menant à la précipitation hydrothermale d'un silicate de calcium connu sous le nom de C-S-H $((\text{CaO})_x\text{-SiO}_2\text{-}(\text{H}_2\text{O})_y)$, qui est à l'origine du durcissement et du relèvement des pâtes de ciment. Le ciment portland ne contient pas de C3S chimiquement pur, il intègre toujours des oxydes, comme par exemple jusqu'à 2% de MgO, ainsi que l' Al_2O_3 , le Fe_2O_3 , le TiO_2 ... et etc. [12] [13]

- Silicate dicalcique (bélite) :

On définit la bélite comme un composant solide du silicate dicalcique ($2\text{CaO}.\text{SiO}_2$ ou C2S) dont la composition chimique en masse est de 65,12% de CaO et de 34,88% de SiO_2 . Cet oxyde mixte (C2S), légèrement altéré par diverses impuretés, représente la bélite et présente des formes variables dans les limites de températures où il est stable. Le ciment bélite ne favorise pas l'augmentation de la résistance mécanique à court terme, étant donné que la phase silicate dicalcique a une faible réactivité hydraulique. Si les conditions de durcissement sont optimales, ses performances mécaniques pourraient s'améliorer avec le temps. [13] [14]

- Aluminate tricalcique (célite) :

L'aluminate tricalcique C3A ($\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$), également appelée célite, est responsable de la formation de la phase aluminate. Elle peut constituer jusqu'à 15 % du clinker en termes de composition en masse. Ce composé est produit à une température dépassant 800°C à partir de l'aluminate monocalcique CA (CaAl_2O_4) grâce à l'incorporation progressive de chaux. Lors du processus de refroidissement du clinker, la phase fondue se transforme en une structure cristalline stable à température ambiante. La phase aluminate, qui est la plus réactive des quatre

phases du clinker, joue donc un rôle crucial dans la plasticité des systèmes cimentaires jeunes en particulier. [15]

- Alumino-ferrite-tétracalcique (ferrite) :

La phase Alumino-ferrite de calcium qu'est appelé aussi la brownmillérite des clinkers, est définie par une composition spécifique : $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$. En réalité, la brownmillérite est une série de solutions solides situées entre C2A et C2F, définies par : $\text{Ca}_2(\text{Al}_x\text{Fe}_{1-x})_2\text{O}_5$, où $x < 0,7$. Le C4AF du clinker Portland est une version impure, qui peut comporter jusqu'à 10% de remplacements par substitution de Fe_2O_3 . Les substitutions atomiques majeures comprennent : Fe^{3+} remplacé par Mg^{2+} , Mn^{3+} , Si^{4+} , Ti^{4+} , et Al^{3+} substitué par Mn^{3+} . La phase ferrique joue un rôle dans la coloration du clinker et du ciment.

Le C4AF pur présente une couleur marronne, tandis que la ferrite qui contient du MgO a une teinte gris-vert. Il s'agit d'une phase de réaction très lente et peu significative pour les caractéristiques du ciment. La quantité de C3A dans le ciment peut être modifiée en la réduisant ou en l'augmentant légèrement, ce qui entraîne une transformation du C3A en C4AF grâce à l'ajustement de la teneur en fer du mélange brut. [16]

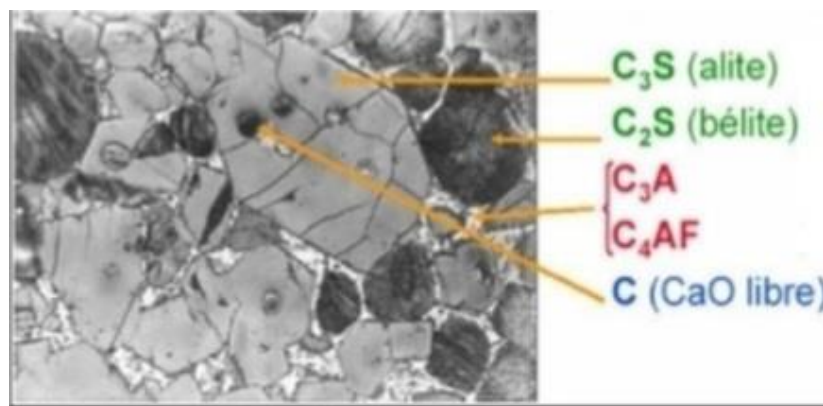


Figure I.3 : Micrographie de clinker. [7]

I.2.2.2. Le gypse :

Le gypse naturel, de la formule $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, est une roche évaporitique [17]. Il est incorporé durant le broyage du ciment Portland pour ralentir la réaction immédiate entre le C3A ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$) et l'eau, régulant ainsi les caractéristiques de prise du ciment et prévenant ainsi le phénomène de « Durcissement rapide » [11]. On distingue deux principales catégories de gypses : Le gypse naturel et le gypse synthétique, ce dernier étant le résultat d'une réaction chimique industrielle. Ses sources principales de gypse chimique incluent : [18]

- La désulfuration des gaz (Désulfogypse).
- La production de l'acide phosphorique (Phosphogypse).

Quand le gypse est exposé à la chaleur, il perd de l'eau et se transforme en héli hydrate de sulfate de calcium (aussi appelé plâtre de Paris). Il peut également apparaître sous forme d'un minéral rare nommé basanite dans des régions essentiellement volcaniques. [19]

I.2.2.3. Les ajouts :

I.2.2.3.1. Les ajouts actifs :

- Le laitier de haut fourneau :

Le laitier de haut fourneau est un sous-produit obtenu lors de la fabrication de la fonte dans un haut fourneau. Il s'agit des éléments résiduels extraits de la gangue du minerai de fer (incluant les cendres du carburant et les fondants) qui sont triés et évacués de la fonte en fusion grâce à la méthode de flottation. En raison de la différence de densité entre la fonte et le laitier, leur séparation se fait par décantation. Le laitier granulé de haut fourneau est produit grâce à un refroidissement rapide effectué par un jet d'eau, ce qui inhibe la cristallisation et permet d'obtenir un matériau à la fois vitré et granulaire. Ce processus de refroidissement permet de convertir le laitier liquide en un granulat fin (technique de granulation du laitier) avec des particules déchiquetées allant à 5 mm, qui sera ensuite utilisé comme complément au liant ou en tant que liant hydraulique. [20]

- Fumée de silice :

La norme ASTM C 1240, spécifiant l'utilisation de la fumée de silice condensée, aussi connue sous le nom de micro silice, comme additif minéral dans le béton, le mortier et le coulis de ciment hydraulique, couvre ce matériau [21]. La fumée de silice, qui contient principalement de la silice, est un matériau minéral constitué de particules fines. Elle a la capacité de combler les vides entre les particules de ciment dans les matériaux durcis. En outre, la fumée de silice a une caractéristique pouzzolanique, ce qui signifie qu'elle peut interagir avec l'hydroxyde de calcium libéré lors de l'hydratation du ciment. Ainsi, les silicates de calcium hydratés assurent une liaison entre les particules du sédiment. Avec la finesse remarquable de la fumée de silice (10 à 20 fois supérieure à celle des cendres volantes), la structure cristalline issue de la réaction est extrêmement fine et apte à combler les vides. La fumée de silice peut également renforcer les caractéristiques mécaniques et physiques du sédiment traité, telles que la résistance à la

compression, la résistance au cycle gel-dégel, la résistance à l'infiltration d'ions chlorure, la résistance aux agressions sulfatiques et la résilience face à la réaction alcali granulat. [22]

- Cendre volante :

Dans les centrales thermiques, la combustion du charbon génère des cendres qui se retrouvent en suspension dans les fumées, d'où leur qualification de « volantes ». Dans un souci de préservation environnementale, ces émanations sont filtrées pour produire une poudre sombre, composée principalement de particules sphériques vitrées (d'un diamètre variant approximativement de 1 à 40 μm) et de résidus plus volumineux et moins lourds, chargés en carbone. La proportion de silice dans la partie vitreuse est généralement entre 30 et 50 %. Associée à la chaux provenant de l'hydratation du ciment Portland, cette silice a la capacité de créer des silicates de chaux hydratée (réaction pouzzolanique). L'impact est deux fois positif : on réduit la quantité de chaux résiduelle, qui constitue le talon d'Achille du béton durci en tant qu'élément. L'effet est doublement avantageux : on réduit la quantité de chaux résiduelle, faiblesse du béton durci en tant que composant soluble dans l'eau, et on augmente la proportion d'hydrates, ce qui renforce les performances mécaniques (tout en diminuant sa perméabilité aux diverses substances nuisibles). La réaction pouzzolanique se développe lentement : à 20°C, elle ne montre pas de sensibilité avant au moins une semaine. Voilà pourquoi les bétons contenant de la cendre volante, ainsi que tous les bétons intégrant des ajouts minéraux, nécessitent une cure intensive. Cependant, l'efficacité marginale des cendres silico-alumineuses en termes de ciment après 90 jours se rapproche souvent de celle du ciment Portland, lorsqu'elles sont utilisées en quantité restreinte. [23]

- Pouzzolane :

La pouzzolane est une substance siliceuse, alumineuse ou ferrugineuse, qui ne possède pas de caractère liant intrinsèquement. Cependant, dans certaines conditions de cristallinité et de structure, elle peut réagir avec la chaux et l'eau à température et pression standards pour produire des produits d'hydratation identiques à ceux d'un ciment. Ils se distinguent chimiquement par une composition intrinsèquement faible ou dépourvue d'oxydes de calcium. On les utilise pour produire du ciment pouzzolanique :

- Soit des résidus industriels (cendres volantes, débris de tuiles et de briques, ...)
- Soit des ressources naturelles pratiquement inutilisable autrement (cendres volcaniques, certains types d'argile). [24]

- La pouzzolane naturelle est un silicate volcanique qui se décompose aisément et qui, lorsqu'elle est combinée à la chaux grasse, crée un mélange qui se solidifie dans l'eau de manière similaire aux ciments ou aux chaux hydrauliques naturelles. [25]
- La pouzzolane artificielle améliorée est également de l'argile cuite, mais on y intègre, avant la cuisson, une quantité suffisante de chaux destinée à réagir avec l'argile et à la rendre ainsi plus apte à s'associer avec la chaux lors du mélange de la pouzzolane obtenue, de cette dernière et d'eau pour fabriquer un ciment hydraulique. [25]

I.2.2.3.2. Les ajouts inertes :

- Calcaire :

Le calcaire est une roche sédimentaire qui se dissout aisément dans l'eau et qui est majoritairement constituée de calcite ou carbonate de calcium (CaCO_3) (au moins 50 %) et de carbonate de magnésium (MgCO_3) [26], ainsi que d'autres carbonates tels que la dolomite, l'aragonite ou la sidérite. Les calcaires sont utilisés dans le domaine de la construction (en tant que pierre de construction) et dans la production de chaux et de ciment [27]. On peut trouver les roches calcaires sous différentes formes : [28]

- Les roches carbonatées organiques sont formées des tests (aragonite-calcite) d'organismes marins ou lacustres vivants, comme les polypiers, rudistes, crinoïdes, lamellibranches, gastéropodes, brachiopodes, bryozoaires, foraminifères et algues unicellulaires, entre autres. On distingue les calcaires construits (comme les stromatolithes, les récifs coralliens, les enrochements d'algues, etc.) des calcaires d'accumulation de tests entiers (lumachelles) et/ou fragmentés, qui sont soumis à la dynamique sédimentaire marine, fluviomarine ou lacustre.
- Les roches biochimiques et physico-chimiques carbonatées se forment grâce à la précipitation du carbonate de calcium et/ou du magnésium, qui est dissous dans l'eau de mer ou dans les eaux saumâtres à douces. Les calcaires oolithiques illustrent parfaitement ce genre de roche formée dans un environnement marin dit « barrière » à forte dynamique sédimentaire. C'est un groupe d'éléments sphériques (oolithe si 0,2 mm) résultant pour chacun de l'accumulation concentrique de coquilles calcaires autour d'un noyau préexistant.

Lors de l'utilisation de calcaire dans le ciment en excès 5% une masse (constituant principale) doit respecter les exigences suivantes : [29]

- Tenure en calcaire : $\text{CaCO}_3 \geq 75\%$,
 - Tenure en argile : adsorption de bleu de méthylène $\leq 1.20\text{g}/100\text{g}$,
 - Tenure de matière organique : $(\text{TOC}) \leq 0.50\%$ en masse.
- Fillers :

Les fillers sont des substances inorganiques minérales, naturelles ou manufacturées qui ont été soigneusement choisies. Ils peuvent être inertes ou posséder des caractéristiques légèrement hydrauliques. On obtient les fillers en broyant finement ou en pulvérisant certaines pierres telles que le calcaire, le basalte, le laitier ou encore la bentonite. Les roches dures telles que le quartz ont la tendance à générer des particules plus angulaires qui nécessitent une consommation en eau supérieure à celle des fillers calcaires, couramment utilisés dans les bétons. Bien que les fillers soient principalement utilisés comme charges minérales, ils possèdent néanmoins une certaine activité physico-chimique, comme l'ouvrabilité ou la capacité de rétention d'eau. Ils agissent d'abord comme un site de nucléation pour l'hydratation du clinker, qu'ils favorisent. [23]

I.2.3. Hydratation de ciment :

L'association du ciment avec de l'eau entraîne la dissolution des anhydres du ciment jusqu'à atteindre un état de sursaturation en hydrates. Ces derniers, étant moins solubles que les anhydres, précipitent. On désigne généralement la pâte obtenue sous le nom de pâte de ciment durci. Il s'agit effectivement d'une suite de réactions chimiques qui donne lieu à ce processus. [30]

I.2.3.1. Hydratation des silicates de calcium (C3S / C2S) :

Dans une solution, le C3S se dissocie en libérant des ions calcium et hydroxyde, ainsi que du silicium. Dès que la limite de solubilité des C-S-H est atteinte, ces derniers précipitent avec un rapport moyen calcium/silicium (C/S) de 1,7 pour un ciment Portland. Cette réaction, entravée par le silicium, n'absorbe pas tous les ions calcium en solution. Dès que la limite de solubilité de l'hydroxyde de calcium est atteinte, il se transforme en portlandite sous forme de précipité. On peut résumer toutes ces réactions avec l'équation globale ci-après :



Dans le même processus, la dissolution du C2S entraîne aussi la précipitation de C-S-H et de portlandite. La précipitation de portlandite est moins forte, par rapport à la même quantité initiale de C3S, car elle apporte une plus faible concentration de calcium en solution.

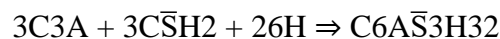
Ce processus est résumé par l'équation bilan :



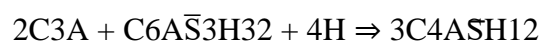
Ces réactions dégagent de la chaleur et favorisent la poursuite du processus d'hydratation du ciment. [30]

I.2.3.2. Hydratation des aluminates de calcium (C3A / C4AF) :

L'aluminate tricalcique C3A est l'anhydre du clinker qui présente la plus grande réactivité. L'incorporation de sulfate de calcium, souvent sous forme de gypse (sulfate de calcium dihydraté), au clinker stimule la précipitation des sulfoaluminates hydratés dont le seuil de solubilité est inférieur à celui des phases aluminates de calcium hydratées. Ainsi, le trisulfure de calcium, également connu sous le nom d'ettringite, est la phase qui présente la plus faible solubilité. Ce processus est résumé par l'équation bilan :



Les ions aluminates qui ne sont pas utilisés dans cette réaction participent à la formation des aluminates de calcium hydraté et, lorsqu'ils sont en présence de carbonates, du monocarboaluminate de calcium. Si la quantité d'aluminates de calcium anhydres dépasse celle du gypse, il y a un manque d'ions sulfate. L'ettringite se dissout en monosulfoaluminate de calcium selon l'équation chimique globale suivante :



Le gypse joue le rôle d'un agent de contrôle de prise. Il paraît que les aiguilles d'ettringite se construisent autour des particules d'anhydrite, ce qui retarde leur hydratation. Un petit pourcentage de C3A renforce la résistance du ciment face à l'attaque sulfatique, en réduisant la quantité d'aluminium, un élément essentiel pour la formation de l'ettringite. Les vitesses des réactions mentionnées précédemment varient, allant de la plus rapide à la plus lente : Dissolution du C3A, C3S, C2S et enfin du C4AF. [30]

I.2.4. Fabrication de ciment :

Le processus de fabrication passe par plusieurs étapes, qui sont résumées dans la figure I.4.



Figure I.4: Schéma récapitulant le processus de fabrication de ciment. [31]

I.2.4.1. Clinkérisation :

La production de ciment requiert la combinaison de quatre composants majeurs en respectant des proportions spécifiques : la chaux (65 %), la silice (20 %), l'alumine (10 %) et l'oxyde de fer (5 %). L'ensemble de ces composants, dénommé cru, est par la suite traité dans des installations utilisant un procédé humide ou sec, en fonction de la teneur en eau du calcaire ou de la craie. Dans le procédé humide, la matière première est broyée et mélangée avec de

l'eau pour former une pâte liquide qui est ensuite homogénéisée et conservée dans d'importants réservoirs cylindriques. La pâte est par la suite placée dans la section supérieure du four.

Dans la méthode à sec, le matériau brut est séché avant d'être broyé. Il est par la suite uniformisé dans de vastes silos. Il est finalement introduit en poudre dans une tour de préchauffage où une décarbonatation partielle a lieu, avant d'être dirigé vers le four proprement dit [32]. La réaction dite « clinkérisation » des divers oxydes est déclenchée par la chaleur intense (approximativement 2000°C) de la flamme. Le processus de clinkérisation commence aux alentours de 1450 °C dans un four rotatif cylindrique qui a un diamètre variant entre 4 et 5 mètres, avec une légère pente (3 à 4°), et une longueur allant de 60 à 80 mètres pour la méthode sèche, et de 150 à 200 mètres pour la méthode humide. Leur rotation lente facilite le transport graduel de la matière à contre-sens des gaz chauds. L'intérieur est tapissé de briques réfractaires... Les granules enflammés doivent être rapidement refroidis. On obtient donc des grains robustes à 150 °C : il s'agit du clinker, qui est acheminé vers d'immenses silos de conservation. [32] [33]

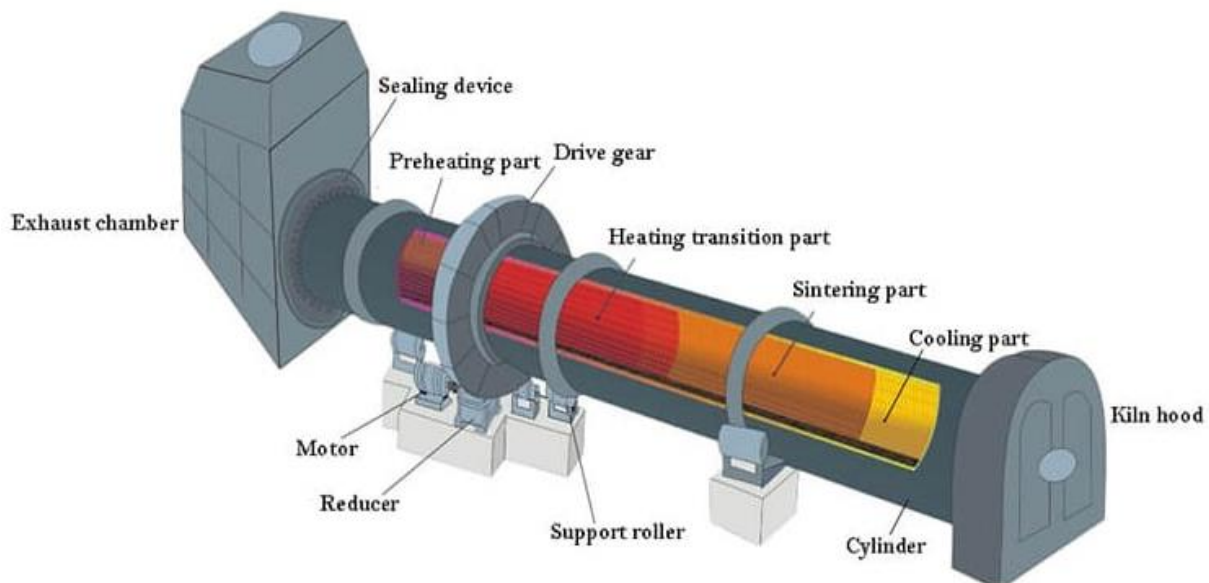


Figure I.5 : Four rotatif. [5]

Au cours du processus de cuisson, plusieurs réactions physico-chimiques se produisent pour générer les divers composants du clinker. [34]

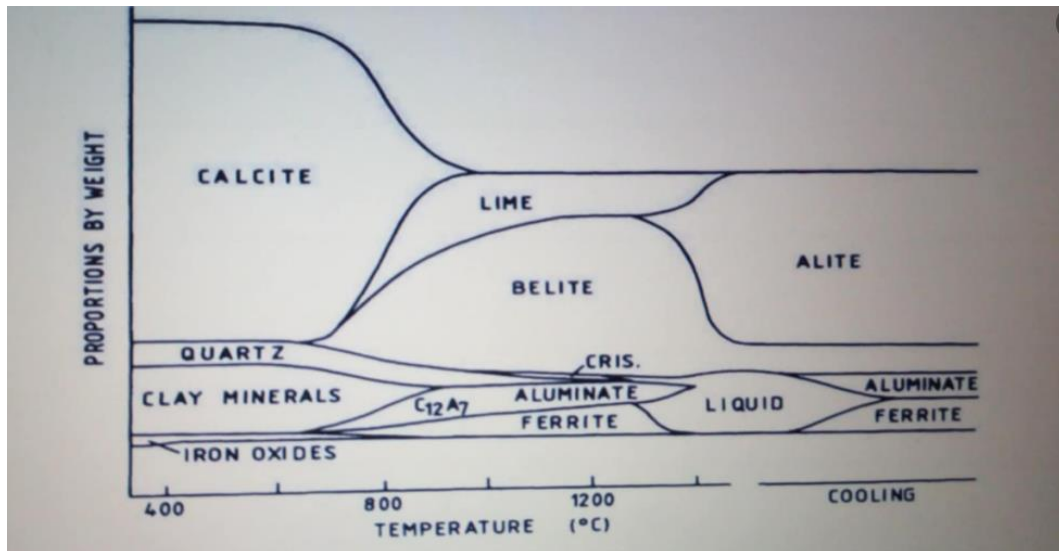


Figure I.6 : Apparition des produits de la clinkérisation. [34]

- ❖ De 100 ° à 550 ° C : Évaporation de l'eau libre et déshydroxylation des substances argileuses.
- ❖ De 700 à 1000 °C :
 - Décarbonation du carbonate de calcium. On peut considérer que la décarbonation est totale.
 - Lancement de la formation des ferrites et des aluminates.
 - La formation du silicate de bicalcique (bélite C₂S) commence aux alentours de 800 °C
- ❖ De 1250 à 1450 °C : apparition de l'alite (C₃S) à partir de combinaison de la chaux libre et de la bélite (C₂S).
- ❖ Refroidissement : transformation des phases liquides d'aluminates et de ferrites en solides.

I.2.4.2. Broyage :

L'étape suivante, qui mène à la production de ciment, est appelée le broyage. Cette phase implique la mesure précise des divers composants, leur mélange et broyage afin d'obtenir une poudre uniforme et extrêmement fine : le ciment. Le clinker, élément fondamental des ciments Portland, peut être moulu avec diverses matières premières industrielles ou naturelles :

- Le laitier de haut-fourneau, qui est également hydraulique ;
- Les cendres volantes provenant des centrales à charbon, qui possèdent des caractéristiques pouzzolaniques ;

- Les fillers, qui sont généralement constitués de calcaire et caractérisés par leur finesse, diverses variantes de sulfate de calcium (gypse, anhydrite) dans la composition du mélange pour contrôler le délai de prise du ciment, ce qui simplifie son application.

Le broyeur à boulets est généralement l'équipement employé lors de cette seconde étape. Des méthodes de broyage innovantes sont actuellement en cours de développement, visant à diminuer considérablement la consommation d'énergie, comme les broyeurs à rouleaux et les broyeurs verticaux. [32]

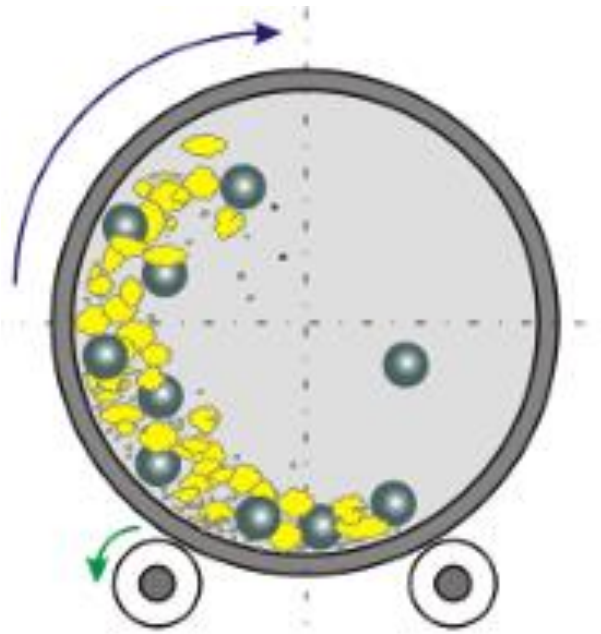


Figure I.7 : Schéma d'un broyeur à boulets rotatif. [16]

I.2.5. Classification de ciment :

I.2.5.1. Classification en fonction de la composition :

Selon la norme algérienne NA442, les ciments sont catégorisés en cinq types principaux basés sur leur composition. On les désigne par CEM et on les classe de 1 à 5 en utilisant les chiffres romains : [29]

- CEM I Ciment Portland,
- CEM II Ciment Portland composé,
- CEM III Ciment de haut fourneau,
- CEM IV Ciment pouzzolanique,
- CEM V Ciment composé.

Tableau I.3 : Classification en fonction de la composition. [29]

Principaux types	Notation des 27 produits (types de ciment courant)	Composition (pourcentage en masse) ^{a)}											Constituants secondaires	
		Constituants principaux												
		Clinker	Laitier de haut fourneau	Fumée de silice	Pouzzolanes		Cendres volantes		Schiste calciné	Calcaire				
			K	S	D ^{b)}	Naturelle P	Naturelle calcinée Q	Siliceuse V	Calcoque W	T	L	LL		
CEM I	Ciment Portland	CEM I	95-100	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5	
CEM II	Ciment Portland au laitier	CEM I/A-S	80-94	6-20	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5	
		CEM I/B-S	65-79	21-35	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5	
	Ciment Portland à la fumée de silice	CEM I/A-D	90-94	—	6-10	—	—	—	—	—	—	—	0-5	
	Ciment Portland à la pouzzolane	CEM I/A-P	80-94	—	—	6-20	—	—	—	—	—	—	0-5	
		CEM I/B-P	65-79	—	—	21-35	—	—	—	—	—	—	0-5	
		CEM I/A-Q	80-94	—	—	—	6-20	—	—	—	—	—	0-5	
		CEM I/B-Q	65-79	—	—	—	21-35	—	—	—	—	—	0-5	
	Ciment Portland aux cendres volantes	CEM I/A-V	80-94	—	—	—	—	6-20	—	—	—	—	0-5	
		CEM I/B-V	65-79	—	—	—	—	21-35	—	—	—	—	0-5	
		CEM I/A-W	80-94	—	—	—	—	—	6-20	—	—	—	0-5	
		CEM I/B-W	65-79	—	—	—	—	—	21-35	—	—	—	0-5	
	Ciment Portland au schiste calciné	CEM I/A-T	80-94	—	—	—	—	—	—	6-20	—	—	0-5	
		CEM I/B-T	65-79	—	—	—	—	—	—	21-35	—	—	0-5	
	Ciment Portland au calcaire	CEM I/A-L	80-94	—	—	—	—	—	—	—	6-20	—	0-5	
		CEM I/B-L	65-79	—	—	—	—	—	—	—	21-35	—	0-5	
		CEM I/A-LL	80-94	—	—	—	—	—	—	—	—	6-20	0-5	
		CEM I/B-LL	65-79	—	—	—	—	—	—	—	—	21-35	0-5	
	Ciment Portland composé ^{c)}	CEM I/A-M	80-94	← 6-20 →								—	0-5	
		CEM I/B-M	65-79	← 21-35 →								—	0-5	
CEM III	Ciment de haut fourneau	CEM III/A	35-64	36-65	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5	
		CEM III/B	20-34	66-80	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5	
		CEM III/C	5-19	81-95	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5	
CEM IV	Ciment pouzzolanique ^{c)}	CEM IV/A	65-89	—	← 11-35 →					—	—	—	0-5	
		CEM IV/B	45-64	—	← 36-55 →					—	—	—	0-5	
CEM V	Ciment composé ^{c)}	CEM V/A	40-64	18-30	—	← 18-30 →			—	—	—	—	0-5	
		CEM V/B	20-38	31-50	—	← 31-50 →			—	—	—	—	0-5	

a) Les valeurs indiquées se réfèrent à la somme des constituants principaux et secondaires.

b) La proportion de fumées de silice est limitée à 10 %.

c) Dans le cas des ciments Portland composés CEM I/A-M et CEM I/B-M, des ciments pouzzolaniques CEM IV/A et CEM IV/B et des ciments composés CEM V/A et CEM V/B, les constituants principaux, autres que le clinker, doivent être déclarés dans la désignation du ciment (voir un exemple à l'article 8).

I.2.5.2. Classification en fonction de la résistance :

Le classe de résistance d'un ciment fait référence à la valeur minimale de résistance obtenue lors des tests de compression, qui est exprimée en MPa. Sur la base de cette résistance à 28 jours, trois classes principales sont établies. Ces trois classes principales sont associées aux sous-classes « R » pour déterminer les ciments ayant une résistance élevée à un stade initial. Ces classes sont désignées comme 32,5, 42,5 et 52,5 et doivent respecter les spécifications ainsi que les valeurs garanties mentionnées dans le Tableau (I.4) [35].

Tableau I.4 : Classification en fonction de la résistance. [29]

Classe de résistance	Résistance à la compression MPa				Temps de début de prise (min)	Stabilité (Expansion) (mm)
	Résistance à court terme		Résistance courante			
	2 jours	7 jours	28 jours			
32.5 N	–	≥ 16	≥ 32.5	≤ 52.5	≥ 75	≤ 10
32.5 R	≥ 10	–				
42.5 N	≥ 10	–	≥ 42.5	≤ 62.5	≥ 60	
42.5 R	≥ 20	–				
52.5 N	≥ 20	–	≥ 52.5	–	≥ 45	
52.5 R	≥ 30	–				

I.2.6. Propriétés de ciment :

I.2.6.1. La résistance mécanique :

L'une des propriétés fondamentales du béton est sa résistance mécanique. En général, le béton est utilisé comme matériau porteur et le rendement d'une structure en béton est lié à sa résistance mécanique qui se développe au fur et à mesure du durcissement du béton. La durabilité mécanique d'un béton est influencée par divers facteurs, notamment :

- Le type et la qualité des composants (ciment, granulats, eau, adjuvant)
- Les conditions d'application de ces composants
- Les conditions environnementales de conservation en termes de température et d'humidité.

Elle se caractérise par sa capacité à résister à la compression et à la flexion. [36]

- Résistance à la compression :

L'une des propriétés majeures du béton durci est sa résistance à la compression à un âge spécifique (28 jours). Elle est identifiée sous le nom de f_{c28} et elle se quantifie par la compression axiale d'un échantillon à 28 jours. Par ailleurs, il est essentiel de comprendre les caractéristiques mécaniques du béton pour concevoir correctement les structures. D'autant plus que le béton est perçu comme un matériau fragile lorsqu'il est exposé à une augmentation de la charge. De plus, le béton ne montre pas de déformations significatives avant sa rupture, et il présente une meilleure performance en compression qu'en traction. La solidité des bétons est influencée par divers facteurs, notamment:

- La catégorie et la classe du ciment,
 - La qualité des granulats employés lors de la réalisation du béton,
 - La quantité de matériaux utilisés,
 - Le rythme et les conditions d'exécution. [36]
- Résistance à la flexion :

En termes mécanique, les résultats de résistance à la flexion sont généralement connexes à ceux de la résistance à la traction. Il est fort probable que les mêmes caractéristiques de composition du matériau influent de façon comparable sur ces deux propriétés [37]. On ne prête généralement pas autant d'importance à la résistance à la flexion qu'à celle à la compression, car le béton est avant tout conçu pour sa capacité à résister à la compression, et son comportement se révèle souvent fragile en flexion. [36]

I.2.6.2. La consistance normale :

Selon la norme EN 196 ne définit pas une proportion rigide eau/ciment. Plutôt que de se baser sur des données précises, les pâtes sont évaluées selon une variété de rapports afin de déterminer qui doit produire une pâte dans laquelle un piston de 10 mm, maintenu dans l'équipement utilisé pour l'aiguille Vicat, pénètre à 6 ± 1 mm du fond du même moule. Cette pâte est définie comme ayant une consistance normale et étant donné que le résultat dépend de l'historique du cisaillement, la méthode de mélange est précisée. Les propriétés rhéologiques des pâtes sont définies par leur consistance normale. Elle implique l'établissement de la valeur rationnelle du rapport E/C (eau/ciment). Il s'agit de la quantité d'eau requise pour obtenir une pâte normale. [38]

I.2.6.3. La prise du ciment :

Il s'agit de l'épaississement et de la diminution de la mobilité de la pâte. L'une des caractéristiques techniques majeures du ciment est sa prise rapide. Il devient ardu de réaliser les éléments (début de prise) ou même impossible (fin de prise). Les temps de prise représentent les intervalles suivant la terminaison du mélange durant lesquels une pâte de ciment non mélangé montre des résistances définies face à l'intrusion d'une aiguille. Les facteurs prédominants qui affectent la pénétration incluent l'humidité de la pâte, la température, le poids et la taille de l'aiguille et, naturellement, la réactivité du ciment.

L'instrument employé est appelé Vicat (1828). Les temps de prise initiale et finale, pour lesquels des valeurs minimales sont définies dans les normes. Habituellement, le gypse est employé à hauteur de 3 à 6 %, en tant qu'agent de régulation de prise. [38]

I.3. Argile calcinée :

I.3.1. Définition :

Le terme argile provient du mot grec argilla dont la racine Argos se réfère à la couleur blanche, qui est celle du matériau utilisé en céramique [39]. Actuellement, différentes définitions de l'argile sont présentées dans les ouvrages spécialisés. Par exemple, Eslinger&Peaver caractérisent les argiles comme un minéral prédominant dans la fraction fine inférieure à 2 microns des roches et des sols. [40]

L'argile est constituée d'un mélange de minéraux argileux (comme le feldspath, le quartz, les carbonates, etc.) et d'éléments indésirables (tels que l'oxyde de fer, le titane, les oxydes et hydroxydes d'aluminium, ainsi que les matières organiques, etc.) [41]. Les minéraux argileux se réfèrent habituellement aux minéraux silicatés dotés d'une structure en couches (phyllosilicates), ce qui apporte une certaine malléabilité à l'argile et qui se solidifie lorsqu'elle est séchée ou cuite. Ils sont également associés à d'autres minéraux qui n'apportent aucune plasticité, tels que le quartz, le calcaire, la dolomie, le gypse, les oxydes, les hydroxydes, etc., et qui ne deviennent pas nécessairement solides par simple séchage ou cuisson. [42]

On reconnaît l'argile comme un matériau constitué de microparticules, et on évoque ses caractéristiques en fonction des différentes échelles dimensionnelles selon le type d'analyse :

- Caractéristiques inhérentes à la structure cristalline et à la composition chimique d'un feuillet élémentaire, restreintes à une maille cristalline idéale (dimension d'un ou deux nanomètres),
- Caractéristiques reposant sur la superposition parallèle de couches élémentaires sous forme de microparticules monocristallines (mesurant quelques micromètres),
- Propriétés concernant une quantité significative de matière, donc le grand ensemble de nombreuses particules réunies en agrégats plus ou moins denses. [39]

I.3.2. Classification :

Les minéraux argileux sont classés selon leur type de structure, l'organisation et la composition, et l'épaisseur des feuillets (7 Å. 10 Å. 14 Å). [43]

Les phyllosilicates se caractérisent par des couches superposées, qui elles-mêmes sont constituées de divers plans appelés octaédriques et tétraédriques [44]. La couche tétraédrique, désignée par la lettre « T », est composée de tétraèdres $[XO_4]$ reliés entre eux par leurs sommets. Ainsi, X fait référence à un cation de petite dimension, Habituellement Si^{4+} ou Al^{3+} , tandis que les oxygènes O^{2-} se positionnent aux sommets. [45]

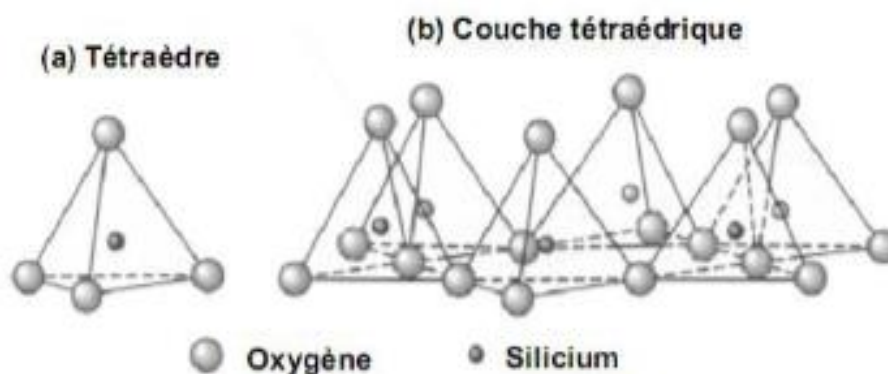


Figure I.8 : Représentation d'un tétraèdre de silice (a) et (b) agencement de tétraèdres en couche tétraédrique. [46]

La répétition d'unités $[MO_4(OH)_2]$ reliées par les bords définit la couche octaédrique, également désignée sous le terme « O », où M représente un cation pouvant être trivalent (tels que Al^{3+}), divalent (comme Mg^{2+}) ou monovalent (comme Li^+). Il est aussi possible que le centre de l'octaèdre reste vacant. [45]

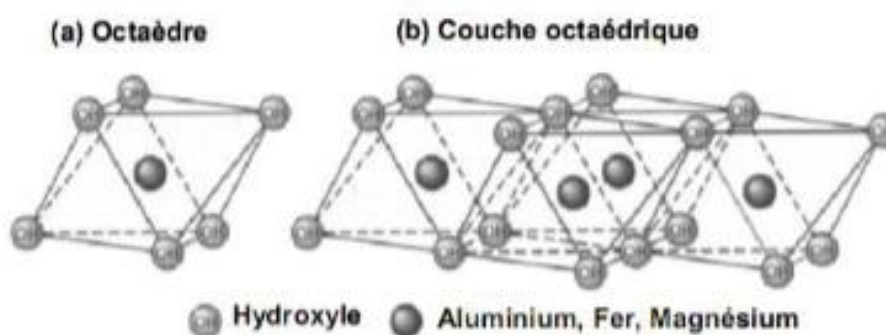


Figure I.9 : Représentation d'un octaèdre de silice (a) et (b) agencement d'octaèdres en couche octaédrique. [46]

On identifie trois sortes de liaisons entre les feuillets : [47]

I.3.2.1. Les minéraux de type 1:1 (TO) 7 Å :

Le feuillet est constitué de l'assemblage d'une couche tétraédrique et d'une couche octaédrique. Les cristallites des minéraux de type 1:1 sont agencées en couches successives, de

sorte que le plan des atomes d'oxygène d'une couche se positionne face au groupe d'hydroxyles de la couche adjacente. C'est alors que des liaisons hydrogène entre les feuillets stabilisent l'empilement. [47]

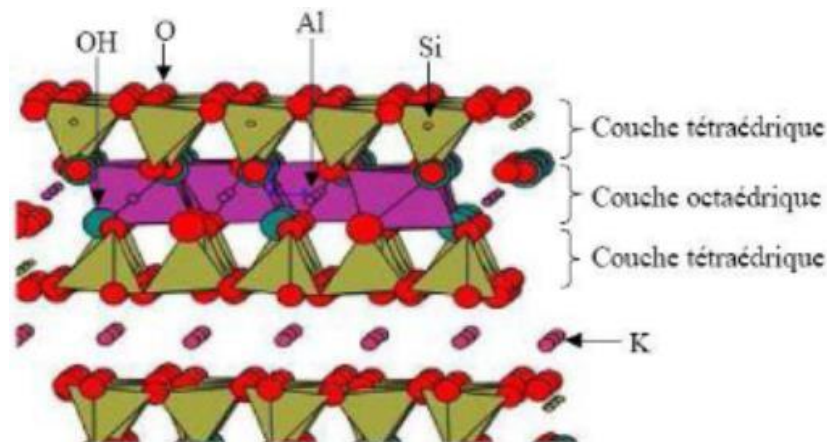


Figure I.10 : Représentation des empilements de tétraèdres siliceux et d'octaèdres alumineux (cas de la kaolinite). [48]

I.3.2.2. Les minéraux de type 2:1 (TOT) 10 Å :

Ce genre de minéraux découle de l'union d'une couche octaédrique positionnée entre deux couches tétraédriques (groupe des micas). Il existe une multitude de minéraux possédant cette structure, car les substitutions sont courantes tant dans la couche tétraédrique que dans la couche octaédrique, ce qui conduit à l'existence de divers cations indispensables pour la neutralisation électrique. La multiplicité des espèces chimiques et la modification des propriétés physico-chimiques des minéraux sont dues à la nature de ces cations et à leur association plus ou moins étroite avec le feuillet qu'ils unissent. [47]

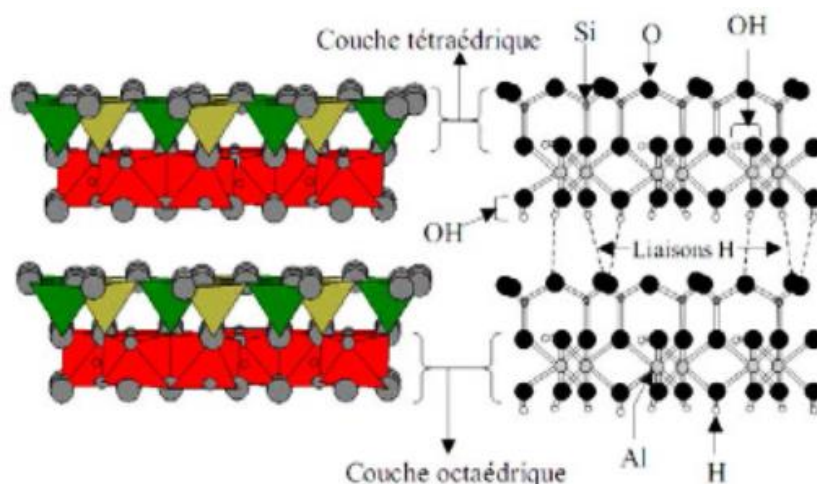


Figure I.11 : Représentation schématique des empilements de tétraèdres siliceux et d'octaèdres. [48]

I.3.2.3. Les minéraux de type 2:1:1 (TOTO) 14 Å :

Ces minéraux proviennent de l'association de deux couches octaédriques et de deux couches tétraédriques (appartenance à la famille des chlorites). La charge du feuillet est équilibrée par une couche d'octaèdre inter foliaire qui renferme des atomes d'aluminium et/ou de magnésium. [47]

Tableau I.5 : Classification des phyllosilicates. [49]

Type de feuillet	Type du minéral	Formule
1:1	kaolinite	$\text{Si}_2\text{Al}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$
	halloysite	$\text{Si}_2\text{Al}_2\text{O}_5(\text{OH})_4, n \text{ H}_2\text{O}$
2:1	pyrophyllite	$\text{Si}_4\text{Al}_2\text{O}_{10}(\text{OH})_2$
	Montmorillonite	$\text{Si}_4(\text{Al}_{2-x}\text{R}^{2+}_x)\text{O}_{10}(\text{OH})_2, \text{CE}_x n \text{ H}_2\text{O}$
	illite	$(\text{Si}_4-\text{Al}_x)\text{Al}_2\text{O}_{10}(\text{OH})_2\text{K}_x$
	muscovite	$(\text{Si}_3-\text{Al}_x)\text{Al}_2\text{O}_{10}(\text{OH})_2\text{K}_x$
	vermiculite	$(\text{Si}_4-\text{Al}_x)(\text{R}^{3+}_{y-x}\text{R}^{2+}_{3-y})\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \text{CE}_{x-y}$
	palygorskite	$(\text{Mg}, \text{Al}, \text{Fe}^{3+})_5[\text{Si}_8\text{O}_{20}](\text{OH})_2(\text{OH}_2)_4, 4\text{H}_2\text{O}$
2:1:1	Chlorite varie	$\text{Si}_{4-x}\text{Al}_x(\text{R}^{2+}_3)\text{O}_{10}(\text{OH}_2\text{R}^{3+}_x\text{R}^{2+}_{3-x})(\text{OH})_6$

I.3.3. Caractéristiques :

Les argiles possèdent une multitude d'applications dues à leurs diverses propriétés, qui sont elles-mêmes le résultat de leur microstructure cristalline et de leur composition chimique. [50]

I.3.3.1. La surface spécifique :

La propriété des argiles, notamment des argiles phylliteuses, qui influence le plus leur emploi en tant qu'adsorbant ou absorbant de polluants est assurément la surface spécifique. Effectivement, sa valeur est fortement liée à d'autres caractéristiques. On identifie deux sortes

de surfaces : la surface externe qui se situe entre les particules d'argile et la surface interne qui correspond à l'espace inter foliaire. Durant le processus d'adsorption, la surface externe des argiles phylliteuses est bien plus accessible à l'entité emprisonnée, par rapport à la surface interne où l'accès aux points d'attache est plus ardu et qui dépend grandement de la dimension et de la nature électrique de l'entité amassée. La surface spécifique est définie comme étant le nombre de mètres carrés par gramme du matériau (m^2/g). [50]

I.3.3.2. Pouvoir de gonflement et d'adsorption d'eau :

En général, toutes les argiles ont une capacité variable à retenir les molécules d'eau. Toutefois, seules certaines sont aptes à intégrer des volumes significatifs de molécules d'eau dans leur espace interfoliaire. Il convient de noter que l'expansion des argiles dépend également de leur composition, car ces matériaux sont formés de minéraux argileux et d'autres minéraux associés. Concernant les argiles naturelles, ce caractère est également associé au lieu de prélèvement, ce qui entraîne une particularité pour chaque sorte d'argile en fonction de sa genèse et de son environnement de formation. De plus, certaines argiles fibreuses contiennent de l'eau adsorbée, mais ne présentent pas de caractéristiques de gonflement. [51]

I.3.3.3. Echange de cations :

Le remplacement partiel de cations dans les couches tétraédriques et octaédriques entraîne un surplus de charges négatives au niveau du feuillet. Cette situation est équilibrée par des cations présents dans l'espace entre les feuilles, qui, dans certaines situations, peuvent être substitués par d'autres cations. [52]

I.3.4. Mode d'obtention :

La calcination, un traitement thermique à haute température qui modifie les propriétés physiques, se décline en deux formes : la calcination flash et la calcination statique. La calcination flash, un procédé de traitement thermique rapide, s'effectue à $1100\text{ }^{\circ}\text{C}$ durant une courte fraction de seconde. Par ailleurs, la calcination traditionnelle au four est effectuée à 700°C pendant une durée de 5 heures. On utilise généralement un four à vis pour le traitement des déchets, tandis qu'un four rotatif est souvent employé dans l'industrie du ciment, bien qu'il nécessite que la matière soit broyée avant d'être introduite [53] [54]. Les argiles calcinées, considérées comme pouzzolanes de synthèse, acquièrent leur caractère réactif pouzzolanique suite à un traitement thermique d'un matériau. [55]

La calcination des argiles est le processus qui consiste à exposer ces dernières à des températures élevées (400 -900°C) pendant une durée de quelques heures, généralement entre 2 et 5 heures. Dû à sa diversité minéralogique, l'argile peut subir différents processus lors de sa calcination:

- L'élimination de l'eau libre,
- La conversion du Quartz α en Quartz β ,
- La déshydroxylation des phyllosilicates,
- La décomposition des substances organiques,
- La décarbonatation des carbonates.

L'objectif principal de toute calcination est d'atteindre le phénomène de déshydroxylation. C'est une question d'extraire l'eau chimiquement associée présente dans les minéraux phylliteux d'une argile. Les tétraèdres de silice et les octaèdres d'alumine, qui sont les constituants fondamentaux des minéraux phylliteux, contiennent des groupements hydroxyle (O-H) à partir desquels proviennent ces molécules d'eau. Une fois déshydroxylés, les oxydes SiO_2 et Al_2O_3 deviennent réactifs et ont la capacité de réagir avec la chaux dans ce qu'on appelle une réaction pouzzolanique. [56]

CHAPITRE II
MATERIELS ET METHODES

Ce chapitre détaillera les matériaux employés, notamment l'argile calcinée, et les diverses techniques déployées pour la préparation des échantillons et la caractérisation des ciments. Il décrira aussi les dispositifs et procédures expérimentales employés pour examiner les caractéristiques physiques, chimiques et mécaniques des formulations analysées.

II.1. Présentation de la société :

La Société des Ciments de Sour El Ghoulane (SC-SEG), qui appartient au Groupe Industriel des Ciments d'Algérie (GICA), est un affilié du Groupe Industriel et Commercial de l'entreprise des ciments et dérivés du centre (GIC-ERCC), établi par le décret n°82-323 du 30 octobre 1982. La SC-SEG, qui fonctionne en tant que société par actions (SPA) avec un capital de 1 900 000 000 DA, est associée au groupe italien BUZZI UNICEM depuis février 2008. Le partenariat prévoit une répartition de 65 % pour GICA et de 35 % pour BUZZI UNICEM.

L'usine de ciment a été édifée par l'entreprise danoise F.L. Smidth et se situe dans la commune de Sour El Ghoulane, précisément au site du Col de Beccouche, à 900 mètres d'altitude. Elle se trouve dans un lieu stratégique, à peu près 25 km de l'autoroute Est-Ouest et à 120 km d'Alger, ce qui lui donne une importance économique considérable dans le Centre du pays.

Les composants essentiels pour fabriquer du ciment comprennent : le calcaire, l'argile, le sable, le gypse et les minerais de fer. Ces matières premières sont prélevées dans les carrières locales, ensuite broyées, séchées et soigneusement transformées en poudre pour produire un mélange homogène. Ensuite, ce mélange est placé dans un four rotatif à une température extrêmement élevée (approximativement 1450°C), où il passe par une cuisson qui permet de produire le Clinker, est par la suite rapidement refroidi et broyé avec du gypse, avec éventuellement d'autres ajouts, pour obtenir le produit final : le ciment. Il est ensuite entreposé dans des silos avant d'être emballé en sacs ou livré en vrac selon de la demande.

SC-SEG a la capacité de produire chaque année un million de tonnes de ciment composé CEM II/A-L 42.5 N (GICA BÉTON). Elle ajuste aussi sa production selon la demande, en offrant divers types de ciments :

- CEM I 52.5 N (GICA INDJAZAT).
- CEM II 42.5 R (GICA BÉTON R).
- CEM II 32.5 N (GICA BENIAN). [57]

II.2. Préparation de l'échantillon :

En réponse aux défis environnementaux associés à la production de clinker, principal contributeur aux émissions de CO₂ dans le secteur du ciment, l'utilisation partielle de matériaux alternatifs en substitution au clinker représente une démarche de développement durable. L'argile calcinée, en raison de sa réaction pouzzolanique suite à un traitement thermique, offre la possibilité de remplacer une portion du clinker tout en assurant d'excellentes performances mécaniques. Cette recherche détaille la mise en œuvre d'un échantillon de ciment où une partie du clinker est substituée par de l'argile calcinée, dans le but de minimiser l'empreinte écologique tout en préservant la qualité du liant.

II.2.1. Les matériaux utilisés :

II.2.1.1. Clinker :

Le clinker est le principal constituant du ciment issu de la cuisson de la farine cru (calcaire + argile) à haute température (1450°C). Sa composition chimique et minéralogique déterminée par fluorescence à rayons X (XRF), influe directement sur les propriétés du ciment obtenue, notamment sur sa résistance mécanique, et elle est portée sur les tableaux II.1 et II.2.

Tableau II.1 : Composition chimique de clinker.

Oxydes	SiO ₃	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	KI
Teneur (%)	20.53	4.78	3.58	64.28	2.18	0.6	0.66	0.13	0.30

Tableau II.2 : Composition minéralogique de clinker.

Oxydes	C3S	C2S	C3A	C4AF
Teneur (%)	63.62	10.03	6.61	10.88

II.2.1.2. Gypse :

Le gypse est un additif essentiel ajouté au Clinker lors du broyage final pour réguler la prise du ciment. Généralement sa masse ajoutée représente entre 3 à 5% ce qui permet d'obtenir un équilibre optimal entre la prise et le temps de travail. Sa composition est donnée en tableau II.3.

Tableau II.3 : Composition chimique de gypse.

Oxydes	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃
Teneur (%)	4.74	1.01	0.39	30.53	2.48	43.29

II.2.1.3. Argile :**II.2.1.3.1. Argile brute :**

Argile brute est un matériau naturel qui est étudié comme substitut partiel du clinker. Elle provient de la région de Mefteh et est utilisée après broyage. Cette argile est de type kaolinite. Sa composition chimique a été étudiée au niveau du laboratoire de la cimenterie et les résultats obtenus sont regroupés dans le tableau (II.4) :

Tableau II.4 : composition chimique de l'argile brut.

Oxydes	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅	TiO ₂	PAF
Teneur(%)	46.78	14.86	6.95	8.4	2.22	0.9	1.75	0.59	0.21	0.73	16.72

II.2.1.3.2. Argile calcinée :

Une masse de 2000g d'Argile brute a été traitée par calcination à une température de 900°C dans un four au sein du laboratoire de l'université de Bouira. Sa composition chimique a été étudiée au niveau du laboratoire de la cimenterie et les résultats obtenus sont regroupés dans le tableau (II.5) :

Tableau II.5 : Composition chimique de l'argile calcinée.

Oxydes	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅	TiO ₂	PAF
Teneur(%)	54.51	17.22	8.14	10.51	2.62	0.61	2.01	0.59	0.25	0.85	3.36

II.2.1.3.2.1. L'analyse minéralogique DRX :

L'analyse minéralogique DRX (la diffraction des rayons X) est une méthode quantitative qui permet de déterminer la nature et la structure cristalline des échantillons. L'analyse a été réalisée au bureau d'étude « analyse physico-chimie des matériaux » du l'université de Bouira à l'aide d'un diffractomètre AXRD de marque PROTO fabriqué au Canada. L'appareil est équipé d'une anticathode en cuivre (Cu) émettant un rayonnement

caractéristique de longueur d'onde ($\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$) , ainsi que d'un détecteur haut résolution. L'analyse a été conduite en mode ($\theta - 2\theta$), avec une tension de 40 KV, un courant de 30 mA, une plage angulaire allant de 10 à 80°C un pas de 0.5°C et un temps de comptage de 1 seconde par pas. Une fois de balayage termine, le diffractogramme obtenue a été traité à l'aide du logiciel associé, permettant d'identifier les différents pics caractéristiques. [58]



Figure II.1 : Appareil AXRD.

II.2.1.4. Calcaire :

Le calcaire est un ajout minéral inerte utilisé principalement pour augmenter la production de ciment.

Tableau II.6 : Composition chimique de calcaire.

Oxydes	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	PAF	Humidité
Teneur (%)	1.41	0.33	0.68	51.28	1.87	0.04	0.09	0.11	43.78	1.68

II.2.2. Méthode de préparation des échantillons :

La préparation se réalise par un mélange uniforme où les quantités de calcaire et de gypse sont maintenues constantes, tandis que les proportions de Clinker et d'argile calcinée varient pour examiner leur influence sur les caractéristiques du ciment. Par la suite, ce mélange est ensuite broyé pour garantir une réactivité optimale et obtenir une granulométrie semblable à celle du ciment Portland.

Les différentes variantes à étudier ont été élaborées conformément aux compositions présentées dans le tableau II.7.

Tableau II.7: Les pourcentages des constituants de ciment.

	Pourcentages %			
	Clinker	Gypse	Calcaire	Argile calcinée
V1	86	5	4	5
V2	81	5	4	10
V3	71	5	4	20
V4	61	5	4	30
V5	56	5	4	35
V6	51	5	4	40

II.2.3. Ciment SARIE (témoin) :

Le ciment SARIE de Lafarge Algérie, qui fait partie du groupe Holcin, est un ciment gris performant classé CEM II 52.5 MPA et conforme à la norme NA 442-2000. Il est essentiellement composé de clinker auquel sont ajoutés du gypse et du calcaire. Ce ciment est élaboré pour garantir une solidité élevée dès son jeune âge, ce qui le rend spécialement approprié pour les structures d'art, la préfabrication lourde et légère. [29]

Plusieurs usines en Algérie sont impliquées dans sa production, notamment à M'sila, Oggaz (Mascara) et Biskra. Le ciment CEM II 52.5 MPA utilisé dans ce travail présente des caractéristiques physico-chimiques, déterminées au laboratoire de Lafarge, comme indiquées dans le tableau (II.8) :

Tableau II.8: Composition chimique de ciment SARIE.

Oxydes	SiO₂	Al₂O₃	Fe₂O₃	CaO	K₂O	Na₂O	MgO	SO₃	PAF
Teneur (%)	19.07	5.15	3.07	63.95	0.69	0.16	1.51	2.77	3.9

Tableau II.9: Composition physique de ciment SARIE.

Blaine (cm²/g)	Début de prise (min)	Fin de prise (min)	Densité	Expansion (mm)
3960	196	243	3.7	0.5



Figure II.2 : Constituants de ciment SARIE.

II.3. Caractéristiques des échantillons :

Dans le contexte de cette recherche, les échantillons étudiés ont été décrits en fonction de différents critères tels que leur composition chimique, leurs propriétés physiques et leurs performances mécaniques.

II.3.1. Caractéristiques chimiques :

II.3.1.1. Perte au feu (PAF) :

- **Définition :**

La perte au feu est la variation de masse d'un échantillon avant et après la calcination à des conditions définies, déterminée en pourcentage par rapport à la masse de la matière sèche. [59]

- **Principe :**

La détermination de la perte au feu en atmosphère oxydante se fait par calcination de l'échantillon à une température de $(950 \pm 25) ^\circ\text{C}$. Elle permet l'élimination du dioxyde de carbone et de l'eau, et l'oxydation partielle ou complète des éléments oxydables présents dans l'échantillon. [59]

- **Conduite de l'essai :**

- Peser le creuset en porcelaine vide : noter cette masse m_0 ,
- Introduire 1g de l'échantillon dans le creuset : noter cette masse m_1 ,
- Placer le creuset dans un four à 950°C et chauffer l'échantillon pendant 1 heure,

- Après la calcination, retirer le creuset avec une pince et le laisser refroidir dans un dessiccateur,
- **Formule de calcul :**

$$\text{PAF (\%)} = \frac{(m_1 - m_2) \times 100}{(m_1 - m_0)}$$

Avec : m_0 : masse du creuset vide,

m_1 : masse du creuset + 1g d'échantillon avant la calcination,

m_2 : masse du creuset + l'échantillon après calcination.

II.3.1.2. Perle fondue :

- **Définition :**

C'est une méthode utilisée pour déterminer la teneur en oxydes d'un échantillon solide. [59]

- **Principe :**

Cette méthode repose sur la fusion d'un échantillon solide avec un fondant à haute température. Après chauffage et refroidissement, le mélange forme une perle vitreuse homogène dotée d'une surface lisse introduite dans un spectromètre à fluorescence X (XRF) de type BRUKER S8 TIGER pour déterminer précisément la teneur en oxydes. [59]

- **Conduite de l'essai :**

- Mélanger 1g d'échantillon fine avec 8g de fondant (lithium tétraborate) dans un creuset .
- Introduire le creuset dans l'appareil VITRIOX GAS .



Figure II.3 : Appareil VITRIOX GAS

- Lancer le programme automatique du VITRIOX GAS : le chauffage du mélange jusqu'à sa transformation en un liquide puis, le système le verse automatiquement dans un moule préchauffé. Après quelques minutes de refroidissement, une perle vitreuse homogène lisse et sans bulle se forme .



Figure II.4 : Perle

- Retirer et placer la perle dans un spectromètre à fluorescence X (XRF) pour obtenir la composition en oxydes.



Figure II.5 : Spectromètre à fluorescence X (XRF).

II.3.2. Caractéristiques physiques :

II.3.2.1. Essai de prise :

- **Définition :**

L'essai de prise est une évaluation en laboratoire visant à déterminer la durée de prise d'un ciment, c'est-à-dire mesurer le temps où le mélange liant l'eau commence (début de prise) et où il se termine (fin de prise). [59]

- **Principe :**

L'essai est effectué afin d'évaluer le début de prise sur la pâte à consistance normalisée, en utilisant un dispositif qui est l'appareil de Vicat. Le début de prise est la période qui s'écoule entre le moment de gâchage liant et celui où l'aiguille de Vicat s'arrête à une profondeur de (60 ± 1) mm. La fin de prise est déterminée lorsque la sonde s'enfonce seulement de 0.5mm. [59]

- **Conduite de l'essai :**

- Verser 500g de ciment dans le godet du malaxeur et le gâcher avec une quantité d'eau (on suivre le rapport de masse E/C) .

- Malaxer la pâte à différentes vitesses .

- Introduire la pâte dans le moule tronconique et araser la surface en s'appuyant sur le bord du moule .

- Positionner le moule dans l'axe de la sonde abaisser la sonde délicatement jusqu'à ce qu'elle touche la pâte, puis relâcher la vis pure permettre à la sonde de s'enfoncer dans la pâte sous son propre poids .

- Après 30s, noter la lecture indiquée sur l'index de l'appareil telle qu'elle est montrée la valeur de l'enfoncement « d » :

- ✓ Si la pâte a une épaisseur de 6mm ($d=6\text{mm} \pm 1\text{mm}$) elle sera d'une consistance normalisée .
- ✓ Si la pâte a une épaisseur de 7mm ($d=7\text{mm}$) elle est insuffisamment hydratée .
- ✓ Si la pâte a une épaisseur de 5mm ($d=5\text{mm}$) cela signifie qu'elle est trop humide.



Figure II.6 : Appareil de VICAT

- Placer le moule dans un bain d'eau à (20 et 90% d'humidité relative) .



Figure II.7 : Appareil de prise de temps

- Tous les 5 min, le moule est brièvement retiré du bain pour suivre son progrès jusqu'à l'observation de début et fin de prise.

II.3.2.2. Finesse Blaine :

- **Définition :**

La finesse Blaine, appelé également la surface spécifique Blaine (SSB), permet d'apprécier le degré de mouture d'un ciment. Elle représente la surface totale développée par tous les grains présents dans un gramme de ciment, exprimée en cm^2/g , elle varie entre 2800 et 5000 m^2/g selon le type de ciment utilisé. Cette caractéristique est cruciale, en effet plus la surface des particules en contact avec l'eau est grande lors du gâchage, plus la réaction d'hydratation se déroule rapidement et intégralement. [59]

- **Principe :**

La surface spécifique du ciment est évaluée en examinant la durée pendant laquelle le passage d'un volume d'air constant traverse une couche de ciment compactée, ayant une finesse et porosité déterminés. [59]

- **Conduite de l'essai :**

- Mesurer la densité du ciment à l'aide d'un pycnomètre .
- Calculer la masse du ciment pour former un lit de poudre dans la cellule par la formule suivante :

$$m = e \times f \times v = 0.5 \times f \times v$$

Avec : m : masse de ciment (g) ;

e : Porosité = 0.5;

f : densité du ciment (g/cm^3) ;

v : volume de la cellule (cm^3).

- Introduire la masse de ciment calculé dans une cellule de perméabilité avec une compression entre deux papiers filtre et un piston .
- Fermer le haut de la cellule avec un bouchon adapté .
- Ouvrir le robinet de l'appareil Blaine et faire monter le liquide manométrique jusqu'à la ligne supérieure par légère aspiration .

- Refermer le robinet et retirer le bouchon pour démarrer l'écoulement du liquide lorsque le liquide parvient aux deuxièmes lignes, le chronomètre est lancé, puis arrêté lorsqu'il arrive aux troisièmes lignes .
- Noter le temps (± 0.25) et le température ($\pm 1^\circ\text{C}$) découlement.



Figure II.8 : Appareil de Perméabilité

II.3.3. Caractéristiques mécaniques :

Cette étude a permis d'évaluer la résistance mécanique du ciment à travers des essais de flexion et de compression, réalisés conformément à la norme EN 169-1. Des éprouvettes prismatiques (40) ont été fabriqués et évalués à divers âges (2, 7, jours) pour examiner la progression des performances au fil du temps.

L'essais de flexion a été réalisé en utilisant un système à trois points d'appui qui comprend deux supports fixes séparés de 100 mm et un poinçon central qui permet l'application de la charge (la charge à une vitesse constante de 50 ± 10 N/s). [59]



Figure II.9 : Essai de Flexion

Les deux moitiés d'éprouvette obtenues après la rupture lors de l'essai de flexion sont ensuite utilisées pour l'essai de compression. La charge est appliquée sur chaque demi-prisme centré sur un dispositif d'une surface ($40 \times 40 \text{ mm}^2$) jusqu'à la rupture . [59]



Figure II.10 : Essai de compression

II.3.3.1. Les mortiers :

Dans cette étude, le mortier utilisé est préparé avec un dosage massique composé de 450g de ciment, 1350g de sable normalisé et 225g d'eau, ce qui correspond à une proportion de

1 :3 :0,5. Il est préparé par un processus de malaxage en plusieurs phases, alternant entre une vitesse lente et une vitesse rapide afin d'assurer une homogénéité optimale. [59]



Figure II.11 : Chambre de conservation par l'eau.

Les éprouvettes sont moulées dans des moules préalablement huilés ayant pour dimensions $40 \times 40 \times 160$ mm . On dispose les moules sur une table vibrante, puis on les remplit en deux couches compactées par vibration pour éliminer les bulles d'air. Une règle métallique est utilisée pour niveler la surface et garantir une finition uniforme. Par la suite, les moules sont conservés pendant 24 heures dans une chambre climatique maintenue à 20 ± 2 °C avec une humidité relative ($\geq 95\%$). Après leur démoulage, les éprouvettes sont plongées dans l'eau, dans des conditions identiques, jusqu'à atteindre leurs âges d'essai (2, 7, 28 jours).

CHAPITRE III
RESULTATS ET DISCUSSION

Ce chapitre expose les résultats issus d'expérimentations menées sur diverses variantes de ciment contenant des proportions variés d'argile calcinée. Le but principal est d'examiner l'effet de cette substitution sur les caractéristiques physico-chimiques et mécaniques du ciment. On procédera à une comparaison des résultats avec ceux d'un ciment témoin (sans argile calcinée), dans le but de définir la variante idéale en matière de performance et de durabilité.

III.1. Caractéristique chimique (Analyse XRF) :

L'analyse XRF offre la possibilité de quantifier les oxydes principaux présents dans chaque variante, et les résultats obtenus sont récapitulés dans le tableau ci-dessous :

Tableau (III.1) : Composition chimique des variantes.

Teneur(%) Variantes	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅	TiO ₂	Totale	PAF
V1	21,34	5,28	3,28	62,25	3,66	2,1	0,82	0,2	0,29	0,15	99,97	0,53
V2	22,85	5,89	3,44	58,55	3,73	2,02	0,9	0,22	0,15	0,31	102,12	2,25
V3	26,19	7,03	3,78	53,05	3,58	1,88	1,01	0,24	0,16	0,37	96,77	3,24
V4	29,56	8,28	4,17	47,69	3,46	1,7	1,14	0,29	0,17	0,44	96,29	3,46
V5	31,14	8,81	4,32	44,97	3,35	1,66	1,19	0,32	0,17	0,47	99,34	3,58
V6	33,1	9,51	4,53	42,63	3,27	1,58	1,25	0,34	0,18	0,5	99,86	3,67

Les résultats de l'étude XRF montrent une variation graduelle de la composition chimique des ciments selon le niveau de remplacement du clinker par de l'argile calcinée. Cette progression se caractérise par une hausse notable des oxydes de silice et d'alumine, due à la teneur inhérente de l'argile calcinée en SiO₂ et Al₂O₃. Par conséquent, le pourcentage de silice augmente de 19,20 % dans le ciment témoin à 33,10 % dans la formulation V6, alors que celui de l'alumine passe de 4,56 % à 9,51 %. L'augmentation des concentrations en SiO₂ et Al₂O₃ est particulièrement significative, car ces oxydes sont engagés dans les réactions de pouzzolane qui pourraient optimiser la microstructure et la durabilité du matériau.

On observe aussi une réduction significative du niveau de CaO, qui chute de 63,33 % (échantillon témoin) à 42,63 % (V6). Cette diminution est directement associée à la réduction graduelle de la quantité de clinker, qui est la principale source en chaux dans le système cimentier.

Les oxydes alcalins, en particulier le K_2O et le NaO , montrent une hausse minime avec la proportion d'argile calcinée, ce qui témoigne de leur présence naturelle dans le matériau de substitution.

En ce qui concerne le SO_3 , on observe une légère baisse alors que la concentration en gypse reste stable à 5 %. On peut attribuer ce phénomène à la réduction des contributions de soufre du clinker, qui est progressivement substitué par une argile calcinée ayant un faible taux de SO_3 .

Les variations des autres oxydes mineurs comme le MgO , TiO_2 ou P_2O_5 restent limitées, mais suivent généralement avec la tendance chimique de l'argile employée.

Tableau III.2 : Les modules chimiques.

	LSF	MA	MS
V1	0,87	1,61	2,5
V2	0,76	1,71	2,45
V3	0,60	1,86	2,42
V4	0,48	1,99	2,37
V5	0,43	2,04	2,37
V6	0,38	2,1	2,36

Avec :

- LSF (Facteur de saturation en chaux) : $LSF = \frac{CaO(\%)}{2.8SiO_2(\%) + 1.8Al_2O_3(\%) + 0.6Fe_2O_3(\%)}$
- MA (module d'alumine) : $MA = \frac{Al_2O_3(\%)}{Fe_2O_3(\%)}$
- MS (module de silice) : $MS = \frac{SiO_2(\%)}{Al_2O_3(\%) + Fe_2O_3(\%)}$

LSF diminue graduellement de 0,874 à 0,379 alors que la proportion d'argile calcinée augmente de 5 % à 40 %. Cette réduction est directement associée à la diminution du clinker, qui est le principal contributeur en termes de CaO . Un taux de saturation en chaux inférieur indique une compétence diminuée à constituer les phases silicatées principales, en particulier le C_3S , cruciales pour le développement rapide des résistances mécaniques. Cette transformation chimique se traduit habituellement par une réactivité initiale plus lente, avec une durée de prise prolongée et des résistances précoces diminuées. Cependant, la diminution de la chaux libre peut apporter des avantages durables pour la durabilité en minimisant les dangers liés à des réactions nuisibles telles que l'expansion.

L'augmentation du module d'alumine (MA), qui passe de 1,61 pour V1 à 2,10 pour V6, indique une concentration croissante du liant en Al_2O_3 , résultat de l'incorporation d'argile calcinée. Cette progression stimule le potentiel pouzzolanique des combinaisons, surtout sur une longue durée. Donc, bien que les résistances initiales diminuent suite à la diminution du clinker, on note un retour graduel de la résistance à 28 jours dès l'introduction de la formulation V4 ($\text{MA} \approx 1,99$).

La teneur en silice (MS) connaît une légère réduction, passant de 2,49 à 2,36. Cette diminution légère reste dans un échelle stable, ce qui illustre un changement proportionnel des oxydes SiO_2 , Al_2O_3 et Fe_2O_3 . Un MS situé entre 2,3 et 2,5 indique un bon équilibre chimique qui favorise la réactivité pouzzolanique, même à des niveaux de substitution importants.

III.2. Analyse minéralogique par DRX :

L'analyse structurale par diffraction des rayons X, illustrée par le diffractogramme présenté en figure III.1, montre une courbe d'intensité en fonction de l'angle de diffraction (2θ). Une large bande diffuse est observée aux alentours de 10° qui témoigne de la présence d'une phase méta kaolinite, caractéristique de la transformation thermique des minéraux argileux comme la kaolinite. Un pic intense et bien défini est également noté, autour de $27-28^\circ$, indiquant la présence d'une phase cristalline dominante, très probablement du quartz (SiO_2), typiquement identifié à cet angle. [60]

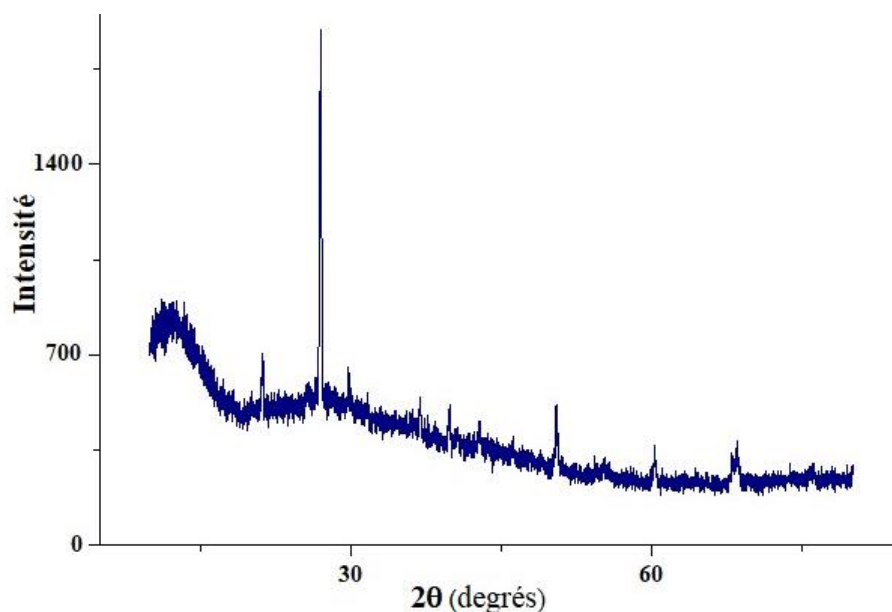


Figure III.1 : Diffractomètre DRX de l'argile calcinée.

Sous l'effet de la calcination, la kaolinite perd sa structure cristalline et se transforme en méta kaolinite, une phase plus réactive. De plus, quelques pics secondaires apparaissent à des angles

plus élevés, suggérant la présence de phases cristallines accessoires telles que l'illite ou des traces de muscovite. Cette configuration, associant une forte composante amorphe à des résidus cristallins, reflète l'effet d'un traitement thermique à haute température, ayant modifié la structure minéralogique initiale de l'argile. [60]

Le diffractogramme de rayons X de l'échantillon de clinker (figure III.2) montre une structure cristalline complexe, avec un pic intense centré autour de $26,6^\circ$, correspondant à la silice cristalline sous forme de quartz (SiO_2). Ce signal indique une présence notable de quartz, phase thermiquement stable, résiduelle ou ajoutée comme charge. En plus de ce pic dominant, plusieurs pics secondaires apparaissent dans la zone comprise entre 20° et 35° , pouvant être attribués à des phases caractéristiques du clinker telles que le silicate tricalcique (C_3S), le silicate bicalcique (C_2S) ou l'aluminate tricalcique (C_3A). Ces phases sont responsables des propriétés hydrauliques du clinker et résultent de réactions solides à très haute température ($> 1400^\circ\text{C}$). Un fond diffus modéré dans la zone des faibles angles suggère également la présence d'une fraction amorphe, généralement due à un refroidissement rapide ou à la vitrification partielle de certains constituants. L'ensemble du profil diffractométrique témoigne d'un matériau polyphasé, riche en silicates calciques et en silice cristalline, caractéristiques typiques d'un clinker Portland. [61]

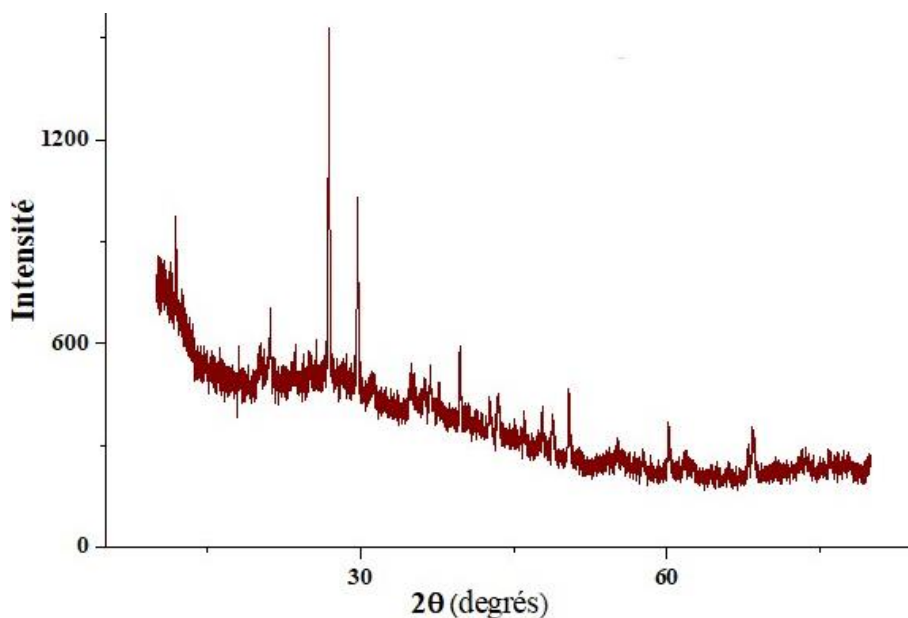


Figure III.2 : Diffractomètre DRX de clinker.

L'analyse comparative des diffractogrammes de V1 à V6, illustré en figure III.3, montre que les positions des pics restent globalement inchangées tout au long de la série, ce qui indique que les mêmes phases cristallines sont présentes dans tous les échantillons. Aucune apparition

de nouveaux pics, ni disparition de pics existants, n'a été observée, ce qui confirme la stabilité minéralogique du système malgré la variation de la proportion d'argile calcinée. En revanche, on note une augmentation progressive de l'intensité et de la netteté des pics à mesure que la quantité d'argile calcinée augmente.

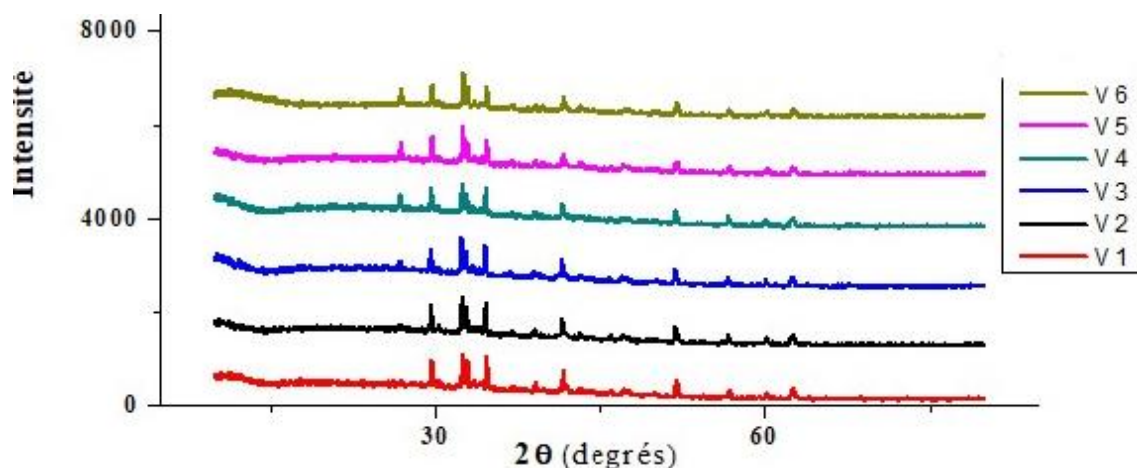


Figure III.3 : Diffractomètre DRX des variantes.

Cette évolution témoigne d'une cristallinité croissante et d'une meilleure organisation structurale des phases existantes, probablement favorisées par la richesse en silice, alumine et oxydes métalliques issus de l'argile. Ainsi, bien que la nature des phases reste constante, la qualité cristalline du matériau s'améliore sensiblement d'un échantillon à l'autre.

III.3. Caractéristique physique :

Pour analyser l'impact de l'argile calcinée sur les caractéristiques physiques du ciment, divers critères ont été examinés : la surface spécifique Blaine, le temps de prise, la densité et l'expansion. Le tableau ci-dessous présente les résultats correspondants :

Tableau III.3 : Composition physique des variantes.

	Blaine	Début de prise	Fin de prise	Densité	Expansion
V1	3929	155	265	3.17	1
V2	3965	158	270	3.14	1,5
V3	4006	163	277	3.03	0,5
V4	3980	166	283	2.89	1
V5	4051	168	287	2.83	2
V6	4081	170	290	2.8	1

La finesse connaît une légère amélioration grâce à la substitution de l'argile calcinée, passant de 3929 cm²/g (V1) à 4081 cm²/g (V6), ce qui représente une augmentation de 3,8 %. Cette hausse est due à la granulométrie plus fine de l'argile calcinée. Les valeurs restent conformes aux normes, avec une finesse moyenne de 3960 ± 100 cm²/g.

Le temps de prise s'allonge en fonction du teneur en argile. La durée de début de prise augmente de 155 minutes à 170 minutes (+9,7 %), tandis que la durée de fin de prise s'élève de 265 à 290 minutes (+9,4 %). Ce retard est considéré comme modéré et acceptable.

La densité subit une diminution significative lors de la substitution. Elle diminue de 3,7 g/cm³ pour le témoin à 3,17 g/cm³ (V1) et descend à 2,80 g/cm³ (V6), ce qui représente une diminution allant jusqu'à 24 % par rapport au témoin. Cette diminution est attribuée à la densité plus faible de l'argile calcinée.

L'expansion reste minime et constante dans tous les variantes, entre 0,5 mm et 2 mm, largement inférieur à 10 mm conformément à la norme 197-1. Donc, le matériau reste stable dimensionnellement, sans possibilité de gonflement.

III.4. Caractéristique mécanique :

Des essais de flexion et de compression ont été réalisés à 2, 7 et 28 jours afin d'évaluer les caractéristiques mécaniques de différentes variantes.



Figure III.4 : Les éprouvettes conservées.

III.4.1. Résistance à la flexion :

La résistance à la flexion a été mesurée par un essai de flexion trois points, réalisé sur des mortiers témoins et sur ceux contenant de l'argile calcinée, les résultats correspondants sont présentés dans le tableau ci-dessous :

Tableau III.4 : Résistance de flexion du mortier.

	Flexion (MPa)		
	2j	7j	28j
Témoin	5,92	8,4	8,75
V1	5,15	7,4	8,9
V2	5,3	8,04	8,3
V3	5,23	7,91	8,86
V4	4,97	7,43	9,37
V5	4,7	6,72	9,9
V6	4,6	7,24	10,1

La figure (III.5) représente l'évolution des résistances à la flexion, constatées à 2, 7 et 28 jours, pour des mortiers de ciment contenant différentes proportions d'argile calcinée, allant de 0% (échantillon témoin) à 40%.

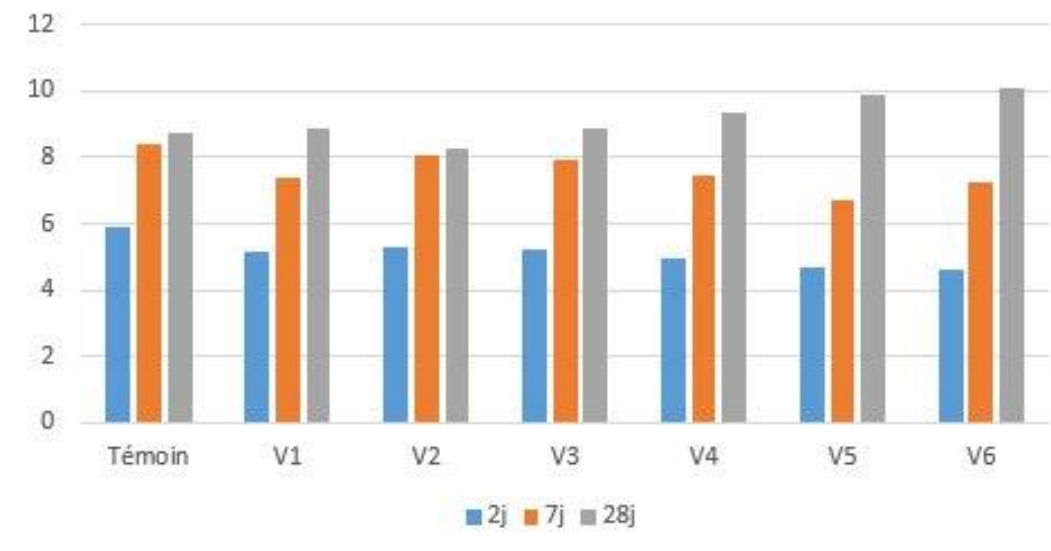


Figure III.5 : Effet de l'argile calcinée sur la résistance de flexion des différentes formulations.

À 2 jours, toutes les variantes qui contiennent de l'argile calcinée montrent une diminution de la résistance à la flexion comparée à l'échantillon témoin (5,92 MPa), avec des valeurs pouvant chuter jusqu'à 4,60 MPa pour la variante 6. Après 7 jours, on observe une légère amélioration des résistances à la flexion, bien que les valeurs restent généralement inférieures à celles du témoin.

A la fin des 28 jours, la résistance à la flexion des diverses variantes montre une amélioration significative comparée au ciment de référence, qui affiche une valeur de 8,75 MPa. Plusieurs variantes de substitution ont présenté des performances supérieures, en particulier V4 (9,37 MPa), V5 (9,90 MPa) et V6 (10,10 MPa), indiquant une amélioration notable.

III.4.2. Résistance à la compression :

La résistance à la compression a été évaluée sur des mortiers, avec et sans substitution par de l'argile calcinée, à différents âges, les résultats obtenus figurent dans le tableau ci-dessous :

Tableau III.5 : Résistance de compression du mortier.

	Compression (MPa)		
	2j	7j	28j
Témoin	29,9	47,85	54,2
V1	29,1	48,4	57,2
V2	27,1	46,2	57,35
V3	27,4	47,75	53,9
V4	24,85	46,75	58,2
V5	23,4	44	59,15
V6	21,8	43,05	59,5

La figure (III.6) représente l'évolution des résistances à la compression, constatées à 2, 7 et 28 jours, pour des mortiers de ciment contenant différentes proportions d'argile calcinée, allant de 0% (échantillon témoin) à 40%.

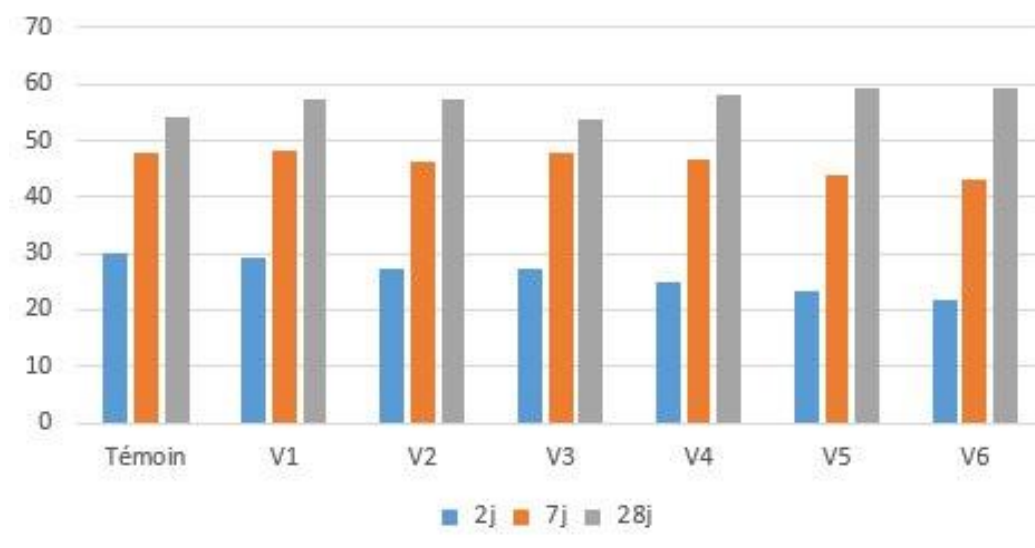


Figure III.6 : Effet de l'argile calcinée sur la résistance de compression des différentes formulations.

À 2 jours, On constate une baisse graduelle de la résistance alors que le taux de substitution augmente. La composition témoin réalise une résistance de 29,9 MPa. En revanche, V6, la formule qui a subi le plus de substitutions, ne dépasse pas 21,8 MPa, ce qui représente une diminution d'environ 27 %.

Après 7 jours, les résistances des variantes tendent graduellement à se rapprocher de celle du témoin. Le ciment de référence présente une résistance de 47,85 MPa, alors que les variantes V1, V2 et V3 montrent des valeurs relativement proches, variant de 46,2 MPa à 48,4 MPa. La version V1 excède même légèrement le témoin. Cependant, les compositions ayant une plus grande teneur en argile (V5 et V6) affichent encore des valeurs inférieures, atteignant respectivement 44 MPa et 43,05 MPa, ce qui indique une diminution d'environ 10 % pour V6.

À 28 jours, toutes les variantes contenant de l'argile présentent des résistances égales ou supérieures à celle du témoin. Le témoin donne une résistance de 54,5 MPa, alors que la variante V6 parvient à 59,5 MPa, ce qui représente une hausse de 9,2 %. D'autres variantes telles que V5 (59,15 MPa) et V4 (58,2 MPa) montrent aussi des améliorations notables. La variante V3 montre une résistance de 53,9 MPa, ce qui représente une différence minime par rapport au témoin (seulement -1,1 %).

Par rapport au ciment témoin, les résistances baissent à 2 jours. Ceci est lié à la diminution du clinker, l'élément principale responsable de l'augmentation rapide des résistances. À ce point, l'argile calcinée n'a pas encore manifesté de réaction significative. Après

7 jours, les performances restent généralement un peu en dessous de celles du témoin, car la réaction pouzzolanique de l'argile calcinée est toujours lente. Elle ne compense pas encore entièrement la diminution du clinker. Toutefois, à 28 jours, il y a une nette augmentation des résistances. La portlandite réagit avec l'argile calcinée, créant des produits qui renforcent la microstructure. Certaines variantes comme V6 surpassent même les performances du témoin, particulièrement en compression. [59]

CONCLUSION GENERALE

Cette étude scientifique avait pour objectif d'améliorer le processus de fabrication du ciment en substituant l'argile calcinée au clinker, dans une perspective d'augmentation de l'efficacité tout en minimisant l'empreinte écologique.

L'étude expérimentale a servi à déterminer les performances mécaniques de diverses formulations contenant de l'argile calcinée. Au cours d'un cycle de 28 jours, les données indiquent qu'un remplacement graduel du clinker par de l'argile calcinée entraîne, jusqu'à un taux compris entre 30% à 40%, une amélioration significative de la résistance à la compression et à la flexion. Cette amélioration est due à la réaction pouzzolanique de l'argile calcinée.

Parmi toutes les variantes évaluées, la variante V6 composée de 51% de clinker, 40% d'argile calcinée, 5% de gypse et 4% de calcaire, a démontré la meilleure performance. Elle offre simultanément la résistance mécanique la plus importante à 28 jours et la réduction maximale de clinker, ce qui se manifeste par une diminution notable du CaO et une hausse des oxydes typiques de l'argile calcinée (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3). Cela prouve qu'il est faisable de combiner l'efficacité mécanique et la performance écologique dans une même formulation.

Cependant, la recherche montre aussi que, au-delà d'un certain pourcentage d'ajout, une surabondance d'argile calcinée pourrait réduire la performance, principalement du fait de la réduction du clinker, l'élément majeur qui assure la résistance initiale. Il est donc crucial de déterminer un taux de substitution idéal qui assure un équilibre entre réactivité, durabilité et caractéristiques mécaniques.

Cette thèse met en évidence le potentiel de l'argile calcinée comme une alternative efficace et durable pour la production de ciments à faible impact sur l'environnement. Les résultats démontrent la possibilité de diminuer de manière substantielle la quantité de clinker, tout en préservant, voire en augmentant, les performances mécaniques à court terme. Cela ouvre la voie pour la création de formules éco performantes, conformes aux exigences actuelles de durabilité et d'efficacité.

Pour approfondir et enrichir ce travail, différentes pistes de recherche peuvent être considérées :

- Évaluer la performance des combinaisons d'argile calcinée sur une période prolongée, en observant spécifiquement la résistance après 28 jours, la réaction aux cycles de gel/dégel et les conditions dans des environnements chimiquement agressifs.

- Améliorer le processus de calcination de l'argile en modifiant des paramètres comme la température, le temps et l'environnement de cuisson pour maximiser sa réactivité pouzzolanique et son impact positif sur les caractéristiques mécaniques du ciment.
- Développer les essais à l'échelle industrielle, en considérant les contraintes réelles de fabrication, la variabilité des matériaux locaux et les facteurs économiques associés à l'application du procédé.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] : Le Ciment : son emploi et ses applications nouvelles en France et à l'étranger : journal mensuel. (1902). Vol 7, P 113-114.
- [2] : UserAm. (2024). Evolution de la cimenterie en Algérie.
- [3] : Hela Ben Mansour. (2018). Etude du comportement à la corrosion des armatures tendues dans le béton contaminé par des ions chlorure. Effet anticorrosif d'un inhibiteur à base de phosphates. Thèse de Doctorat. Université de Lyon, P 6.
- [4] : Mehamdia Ali. (2019). Contribution à la caractérisation de la durabilité du béton par les ultrasons. Thèse de Doctorat. Université 8 Mai 1945 Guelma, P 6.
- [5] : Hemida Ikram., Bendjamaa Zakia Hayet. (2023). Etude d'un mortier ordinaire par l'incorporation d'une argile calcinée. Mémoire master. Université Ibn Khaldoun de Tiaret, P 6-27.
- [6] : Vivien P. B. Esnault. (2013). Compréhension et modélisation du comportement du clinker de ciment lors du broyage par compression. Thèse de Doctorat. Université Paris-Est Marne La Vallée, P 8.
- [7] : Elodie Romilliat. (2006). Etude des modes d'action d'agents de mouture sur le broyage du clinker. Thèse de doctorat. Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne, P 11-12.
- [8] : Carl Nachtergal., Lucien Nachtergal. (1994). Agenda du bâtiment. Bruxelles: Boeck Supérieur, P 5.
- [9]: Thakur Publication. (2021). Basics of Civil & Mechanical Engineering: Solved Series (e-Book) for B. Tech 1st & 2nd Semester of KTU Kerala. Thakur Publication Private Limited, P17.
- [10] : NIGRI Ghania. (2018). Nouvelle élaboration d'un liant hydraulique. Thèse de Doctorat. Université 08 mai 1945 de Guelma, P27-34.
- [11] : Véronique Baroghel-Bouny. (1994). Caractérisation microstructurale et hydrique des pâtes de ciment et des bétons ordinaires et à très hautes performances. Thèse de Doctorat. Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, P 52.
- [12]: Farid Begarin., Sandrine Garrault., André Nonat., Luc Nicoleau. (2009). Hydration of alite containing aluminium. 29th Cement and Concrete Science Congress, Leeds, United Kingdom.

[13] : G .C.Bye .(1999). Portland Cement : Composition, Production and Properties. Édition : illustrée, Thomas Telford, P 11-12.

[14] : Adil BOUREGBA. (2020). Contribution à l'étude des propriétés liantes des silicates et phosphates de calcium Ca_2SiO_4 et $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$. Thèse de Doctorat. Université Mohammed V de Rabat, P 21-22.

[15] : Edwige Nicolas. (2020). COMPATIBILITÉS ET INCOMPATIBILITÉS LIANTS CIMENTAIRES/SUPERPLASTIFIANTS. Thèse de Doctorat. Université du Luxembourg, P 8-9.

[16] : Souad Bouregaya. (2018). Synthèse d'un ciment alitique à moindre impact environnemental à partir de vase de barrage et utilisant le sulfate de zinc comme minéralisateur. Thèse de Doctorat. INSA de Toulouse ; Université des Sciences et de la Technologie Mohamed Boudiaf USTO-ORAN, P 23-34.

[17] : Thibault Coppée., Myriam Duc., Jeanne-Sylvine Guedon., Amade Pouya., Béatrice Béchet. (2022). Caractérisation de roches gypseuses : microstructure et propriétés mécaniques. 11èmes journées nationales de géotechnique et de géologie de l'ingénieur, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon.

[18]: F. Karim, M. Waqif, L. Saadi. CARACTERISATION PHYSICO-CHIMIQUE DU GYPSE SYNTHETISÉ ET DU PHOSPHOGYPSE. Laboratoire de Matières Condensées et Divisées, Equipe d'Etude et Valorisation des Ressources Minérales et des Matériaux Synthétiques EVAR-MIMAS, Département de Chimie, Faculté des Sciences et Techniques Guéliz, Marrakech, Maroc.

[19]: Maria S. Konsta-Gdoutos. (2007). Measuring, Monitoring and Modeling Concrete Properties: An International Symposium dedicated to Professor Surendra P. Shah, Northwestern University, USA. Édition : illustrée, Springer Science & Business Media, P 373.

[20] : Djallal Eddine Telmat., Hayet Cherfa., K. Ait Mokhtar. (2013). Étude d'un matériau routier composé de laitier de haut fourneau et de sable de dune.

[21]: Joseph F Lamond., J. H. Pielert.(2006). Significance of Tests and Properties of Concrete and Concrete-making Materials. Edition : illustrée, révisée, P 421-457.

[22] : S. Mezazigh., Javad Behmanesh. (2009). Effet de la fumée de silice sur le comportement mécanique et géotechnique d'un sédiment stabilisé à base de ciment et additifs. Environnement, Ingénierie & Développement.

[23] : François de Larrard.(2002). Construire en béton : l'essentiel sur les matériaux. Chaussées. Edition : Presses des Ponts, P 31.

[24] : Lakhdar Benamara., Kamal Ouhba., André Hamwi. (2013). Élaboration d'une pouzzolane de synthèse à partir des sédiments de barrage. Environnement, Ingénierie & Développement.

[25] : Description des machines et procédés pour lesquels des brevets d'invention ont été pris sous le régime de la loi du 5 Juillet 1844. France : Imprimerie Nationale, P 6.

[26] : <https://uae.fr/glossaire/calcaire/>

[27] : Fiche d'information minérale par table régionale de concertation minière (TRCM) du Saguenay-Lac-Saint-Jean. (2020).

[28] : Charles N., Colin S., Lefebvre G. (2017) - Mémento Carbonates calciques et magnésiens. Rapport final.

[29] : la norme algérienne NA 442.

[30] : Philippines Lalan. (2016). Influence d'une température de 70°C sur la géochimie, microstructure et la diffusion aux interfaces béton/argile : expérimentations en laboratoire, in situ et modélisation. Thèse de Doctorat. Université de recherche Paris Sciences et Lettres, P 14-15.

[31] : Le CSR vu par LAFARGE.

[32] : Sophie Trachte. (2012). Matériau, matière d'architecture soutenable : Choix responsable des matériaux de construction, pour une conception globale d'architecture soutenable. Presses univ. De Louvain, P 455-456.

[33] : Christine Mary-Dippe, René Osta. (2020). Connaissance du béton : Matériau - Mise en oeuvre –Pathologie. BoD - Books on Demand, P 15.

[34] : Othmane Bouchenafa. (2019). Mécano synthèse et matériaux de construction : optimisation et application pour la clinkérisation et la géo polymérisation. Thèse de doctorat. Université Paris Est. Français, P 36-37.

[35] : Daguiani Salah Eddine. (2024). Contribution à l'étude des ciments spéciaux destinés aux ouvrages en zones sahariennes. Thèse de Doctorat. Université Kasdi Merbah-Ouargla, P 6.

[36] : Sayad Youcef. Comportement des bétons dans les milieux agressifs (cas de Biskra). Thèse de doctorat. Université Mohamed Khider – Biskra, P 55-56.

[37] : German Hermida. (2008). Influence du volume de pâte et de la concentration en ciment sur la performance du béton : vers le développement d'un béton à contenu minimal en pâte. Thèse de doctorat. École normale supérieure de Cachan - ENS Cachan, P 23.

[38] : BOUGLADA Mohammed Salah. (2019). Caractérisation physico-chimique et microstructurale des ajouts minéraux. Thèse de Doctorat. Université Batna 2 – Mostefa Ben Boulaïd, P 62.

[39] : Michel Rautureau., Nicole LIEWIG., Celso GOMES., Mehrnaz KATOUIAN SAFADI. (2010). Argiles et santé Propriétés et thérapies. LAVOISIER, P 31-32.

[40]: A. Qlihaa., S Dhimni., F Melrhaka., N Hajjaji., A Srhiri. (2016). Caractérisation physico chimique d'une argile Marocaine. Laboratoire de Matériaux, Electrochimie et Environnement. Faculté des Sciences, Université Ibn Tofail de Kénitra.

[41] : Nadjima Bouzidi. (2012). Influence des impuretés des kaolins sur les propriétés des produits de cuisson. Thèse de Doctorat. Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint- Etienne, P 3.

[42] : Marthe Tatiana Diatta. (2016). Matières premières argileuses du Sénégal : caractéristiques et applications aux produits céramiques de grande diffusion. Thèse de doctorat. Université de Limoges; Université Assane Seck (Ziguinchor, Sénégal), P 4.

[43] : Norbert Clauer. (2005). Les minéraux argileux Leur rôle et importance dans un site de stockage de déchets radioactifs en couche argileuse profonde.

[44] : Fayza GRIDI-BENNADJI. (2007). Matériaux de mullite à microstructure organisée composés d'assemblages muscovite – kaolinite. Thèse de doctorat. Université de Limoges Ecole Doctorale Sciences - Technologie – Santé, P 27.

[45] : David Guillermin. (2018). Le rôle des matériaux hybrides à base d'argiles dans la protection des œuvres d'art. Thèse de Doctorat. Sorbonne Université, P 25.

[46] : Mohamed Amine ZENASNI. (2015). Synthèse et caractérisation des nano composites biodégradables élaborés par trois procédés (intercalation en solution, polymérisation in situ et par voie fondue). Thèse de Doctorat. Université de Lorraine, P 10-11.

[47] : Mohamed Réda BOUDCHICHA. (2010). ÉTUDE DE LA CRISTALLISATION ET DES PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES ET DIÉLECTRIQUES DE CÉRAMIQUES PRÉPARÉS À PARTIR DE KAOLIN-DOLOMITE. Thèse de Doctorat. Université El-Hadj Lakhder–BATNA, P 8-9.

[48] : BENSID NADIA. (2016). Elaboration des matériaux organo-inorganiques à base De produits naturels et leurs applications dans des processus chimiques. Thèse de Doctorat. Université BADJI MOKHTAR–ANNABA, P 15-20.

[49] : Samira Selmani. (2015). Formulation de liants aluminosilicates à partir de différentes argiles tunisi- ennes. Thèse de doctorat. Université de Limoges; Université de Sfax (Tunisie), P 16.

[50] : Ngassa Piegang Guy Bertrand. (2015). Matériaux composites inorgano organiques à base de smectite obtenus par Co intercalation de la thiouree et des ions cetyl trimethyl ammonium (CTA+) : Synthèse, caractérisations et applications electroanalytiques. Thèse de Doctorat. Université de Yaounde I, P18-19.

[51] : Yassine Bentahar. (2016). Caractérisation physico-chimique des argiles marocaines : application à l'adsorption de l'arsenic et des colorants cationiques en solution aqueuse. Thèse de doctorat. Université Côte d'Azur (2015 - 2019); Université Abdelmalek Essaâdi (Tétouan, Maroc), P 40-41

[52] : Marc X. Reinholdt. (2001). Synthèse en milieu fluoré et caractérisation de phyllosilicates de type montmorillonite. Etude structurale par spectroscopies d'Absorption des Rayons X et de Résonance Magnétique Nucléaire. Thèse de Doctorat. Université de Haute Alsace –Mulhouse, P15.

[53] : Yeakleang Muy. (2022). Effet de la calcination d'un sédiment sur sa capacité à se substituer partiellement au ciment Portland. Thèse de Doctorat. INSA de Rennes, P24.

[54] : Rackel San Nicolas. (2011). Approche performantielle des bétons avec métakaolins obtenus par calcination flash. Thèse de Doctorat. Université Paul Sabatier - Toulouse III, P36.

- [55]** : Guillemette Cardinaux. (2021). Liants ternaires à base d'argile calcinée : Etude des mécanismes de structuration, optimisation mécanique et durabilité. Thèse de Doctorat. École centrale de Nantes, P 63.
- [56]** : Siline Mohammed. Utilisation des argiles et des déchets argileux comme ajouts pouzzolaniques pour la fabrication des éco-ciments : Revue bibliographique. Laboratoire de Matériaux et Mécanique des Structures (LMMS), Université de M'sila, Algérie.
- [57]** : Bensalem, A. (2019). Étude de la performance énergétique de la cimenterie de Sour El Ghozlane (Mémoire de Master, Université Akli Mohand Oulhadj – Bouira, Faculté de Technologie). Université de Bouira.
- [58]** : Bureau d'étude « analyse physico-chimie des matériaux » du l'université de Bouira.
- [59]** : Laboratoire de contrôle qualité. Société des Ciments de Sour El Ghozlane (SC-SEG). (2025). Informations techniques interne. SC-SEG, Sour El Ghozlane.
- [60]** : Laita, E., & Bauluz, B. (2018). Mineral and textural transformations in aluminium-rich clays during ceramic firing. Applied Clay Science, 152, 284-294.
- [61]**: Viana, F. M., Gouvea, D., & Pileggi, R. G. (2010). Study of the major phases of the cement clinker; Estudo das fases maiores do clínquer cimenticio.

Résumé

Ce travail expérimental porte sur la préparation d'un ciment à base d'argile calcinée à 900 °C, en procédant à une substitution partielle du clinker par différents pourcentages d'argile calcinée (5 % à 40 %). L'objectif principal est d'évaluer l'effet de cette substitution sur les propriétés physico-chimiques et mécaniques du ciment produit. Les résultats montrent que l'introduction d'argile calcinée améliore les performances mécaniques jusqu'à 40% de substitution. La réactivité de l'argile calcinée contribue également à la durabilité du matériau. Ainsi, la formulation d'un ciment à base d'argile calcinée représente une alternative technique et environnementale intéressante, capable de répondre aux exigences de performance tout en réduisant les émissions liées à la production de clinker.

Mots-clés : Ciment, argile calcinée, clinker, réactivité pouzzolanique.

Abstract

This experimental work focuses on the preparation of a cement incorporating calcined clay at 900 °C, by partially replacing clinker with varying percentages of calcined clay (from 5% to 40%). The main objective is to assess the effect of this substitution on the physico-chemical and mechanical properties of the resulting cement. The results show that the incorporation of calcined clay improves mechanical performance up to a 40% substitution level. The pozzolanic reactivity of the calcined clay also contributes to the overall durability of the material. Thus, the formulation of cement based on calcined clay appears to be a technically and environmentally viable alternative, capable of meeting performance requirements while reducing emissions associated with clinker production.

Keywords: Cement, calcined clay, clinker, pozzolanic reactivity.

المخلص

من خلال تعويض جزئي . يركز هذا العمل التجريبي على تحضير إسمنت يحتوي على طين محمص بدرجة حرارة 900 للكلنكر بنسب متفاوتة من الطين المحمص (من 5% إلى 40%). ويهدف البحث إلى دراسة تأثير هذا التعويض على أظهرت النتائج أن إدماج الطين المحمص يحسن الأداء الخصائص الفيزيائية والكيميائية والميكانيكية للإسمنت الناتج. الميكانيكي حتى نسبة تعويض تصل إلى 40%. كما يساهم النشاط البوزولاني للطين المحمص في تعزيز متانة المادة على المدى الطويل. وعليه، فإن تركيبة الإسمنت المعتمد على الطين المحمص تُعد بديلاً تقنياً وبيئياً فعالاً، قادراً على تلبية متطلبات الأداء مع تقليل الانبعاثات الناتجة عن إنتاج الكلنكر.

الكلمات المفتاحية: إسمنت، طين محمص، كلنكر، نشاط بوزولان