

ملحق القرار رقم: 933 المؤرخ في: 20 جويلية 2016

الذي يحدد القواعد المتعلقة بالوقاية من السرقة العلمية ومكافحتها

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

مؤسسة التعليم العالي:

نموذج التصريح الشرفي

خاص بالالتزام بقواعد النزاهة العلمية لانجاز بحث

أنا الممضي أدناه،

السيد: رواحي جلال... الصفة: طالب، أستاذ باحث، باحث دائم: ماستر.....

الحامل لبطاقة التعريف الوطنية رقم: 01170358 والصادرة بتاريخ: 24/09/01

المسجل بكلية العلوم والتكنولوجيا قسم كيمياء الصناعات.....

و المكلف بإنجاز أعمال بحث (مذكرة التخرج ، مذكرة ماستر ، مذكرة ماجستير ، أطروحة

دكتوراه)، عنوانها: Impact de l'argile calcinée sur les propriétés physico-chimiques et cliniques du ciment, nouveau produit comme additif pour améliorer la qualité du ciment (Start-Up)

أصرح بشرفي أنني ألتزم بمراعاة المعايير العلمية والمنهجية ومعايير الأخلاقيات المهنية والنزاهة الأكاديمية المطلوبة في انجاز البحث المذكور أعلاه.

التاريخ: 19.06.2025

امضاء المعني



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

بسكرة في: 2025/06/18

جامعة محمد خيضر-بسكرة

كلية العلوم والتكنولوجيا

قسم الكيمياء الصناعي

إذن بإيداع مذكرة الماستر بعد التصحيحات

نحن الممضين أسفله الأساتذة: ساكري عادل و بورمل الشريفة

الرتبة: أساتذة محاضرين قسم أ

أساتذة مشرفين على مذكرة ماستر -للطالب (ة): رواحنة جمال

الشعبة: هندسة الطرائق

التخصص: هندسة الطرائق للبيئة

بعنوان: Impacts de l'argile calciné sur les propriétés physique et chimique du ciment (Nouveau produit comme additif pour améliorer la qualité du ciment)

نرخص بإيداع المذكرة المذكورة.

رئيس لجنة المناقشة

الأستاذ المشرف



Université Mohamed Khider de Biskra
Faculté des sciences et de la technologie
Département de chimie industrielle

MÉMOIRE DE MASTER

Domaine : Sciences et Techniques

Filière : Génie des procédés

Spécialité : Génie des Procédés de l'environnement

Réf. : ROUAHNA Djamel « Impacts de l'argile calciné sur les propriétés physique et chimique du ciment (Nouveau produit comme additif pour améliorer la qualité du ciment) », Mémoire de Master, Université Mohamed khider de Biskra, Algérie(2025).

Présenté et soutenu par :

ROUAHNA Djamel

Le : Juin2025

**Impacts de l'argile calciné sur les propriétés physique et chimique du
ciment
(Nouveau produit comme additif pour améliorer la qualité du ciment)
(Start-Up)**

Jury :

Dr. NOUIOUA Asma	MCA	Université de Biskra	Président
Dr. GHEBGHOUB Fatima	MCA	Université de Biskra	Eexamineur
Dr. SAKRI Adel	MCA	Université de Biskra	Rapporteur
Dr. BOUREMEL Cherifa	MCA	Université de Biskra	Rapporteur
Dr. HAMDI Fella	MCA	Université de Biskra	Représentant d'incubateur
Mr. AZZAZ Yacine	Grade	Manager qualité Cilas	Représentant Cilas

Année universitaire :2024-2025

Remerciement

Ce travail a été réalisé au niveau du département contrôle qualité de la société CILAS BISKRA CIMENT.

Avant tout, je remercie Dieu le tout Puissant, qui m'a donnée la force, la patience et la volonté pour accomplir ce travail.

*Il est difficile d'exprimer, en quelques lignes, mes remerciements à l'égard de mon encadreur de mémoire, **Dr. Adel Sakri**. En effet, j'ai le privilège d'être encadré et orienté par il, d'apprécier ses qualités et ses valeurs. Ce travail est donc pour moi, l'occasion de lui témoigner ma profonde gratitude pour ses précieux conseils, ses critiques constructives ses encouragements et sa rigueur scientifique qui m'ont été très utiles pour mener ce travail. Mes remerciements s'adressent également à **Dr. NOUIOUA Asma** pour avoir accepté de présider le jury de soutenance et aussi **Dr. GHEBGHOUB Fatima** pour avoir accepté d'examiner ce travail.*

*Je remercie chaleureusement les travailleurs de la société CILAS BISKRA. Je remercie très spécialement Le Groupe de Qualité de l'Usine de CILAS (**Mr. Yacine Azzaz, Mr. Samir Kahloul, M^{me}.Zahia, Mr. Walid Hassin, Mr. Med Bouziane, Mr. Riguet Khaled, Mr. Abderrazak Bensmaine, Mr. Badreddine Ouamaine, Mr. Hamza Benouakhir, Mr. Khaled Benchih, Mr. Lakhder Bahaz, Mr. Ramzi Gadouam, Mr.Nabil Chaouchakhouane**).*

Pour le soutien que vous m'avez apporté, ainsi que les précieux conseils qui m'ont permis d'accomplir mon travail avec succès.

Enfin on remercie chaleureusement tous nos enseignants du Département de chimie industrielle, pour leurs soutiens et formation ainsi qu'à toute personne ayant contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Je conclurai, en remerciant vivement à toutes ma famille qui m'a toujours supporté moralement pendant toute année d'étude.

Djamel

Dédicace

Louanges à Dieu, remerciements et gratitude pour le commencement et la fin.

{Et notre dernière supplication est : Louanges à Dieu, Seigneur des Mondes.}

Je dédie le fruit de mes humbles efforts

À celui dont je porte fièrement le nom et qui m'a appris que la vie est un combat, dont les armes sont la connaissance et le travail.

Mon cher père, « **Muhammad** », que Dieu lui fasse miséricorde et lui accorde une place dans son vaste paradis.

À celui qui n'a jamais quitté mon esprit et m'a appris le sens de la compassion et du don, quel qu'il soit.

Ses prières et son contentement sont le secret de ma réussite. Ma mère bien-aimée, « **Fatma Gagui** », que Dieu lui fasse miséricorde et lui accorde une place dans son vaste paradis.

À mon soutien dans la vie et à celle sur qui je compte dans les grandes et les petites choses, ma chère **femme**

À mes **enfants**, qui sont la lumière de mes yeux.

À mes chers **frères** et **sœurs**, chacun nommé par son nom.

À tous ceux qui portent le titre de « Rouahna ».

À mon frère et collègue le manager qualité, « **Mr. Azzaz Yacine** ».

, qui m'a aidé et soutenu au cours des trois dernières années.

Je dédie également mon œuvre. Ceci est pour tous ceux qui m'ont soutenu et soutenu, ne serait-ce que par un mot ou une prière sincère en mon absence.

Djamel

Table des matières

Table des matières

Liste des tableaux	i
Liste des Figures	ii
Introduction générale	1
Chapitre I : Etude bibliographie du ciment	
I : Processus de fabrication du ciment.....	3
I.1.Description du fonctionnement de la cimenterie CILAS	3
I.2.Définition de ciment	4
I.3 Constituants de base du ciment	4
I.3.1. Matières Premières.....	4
I.3.1.2. Argile.....	5
I.3. 2. Les matières corrections	6
I.3. 2. 1. Minerai de fer (Fe_2O_3).....	6
I.3. 2. 2. Sable	7
I. 3. 2. 3. Bauxite	7
I. 3. 2. 4. Gypse	7
I. 3. 3. Les matières secondaires (Ajouts)	8
I. 3. 3. 1. Pouzzolane	8
I. 3. 3. 2. Les fillers calcaires	9
I. 3. 3. 3. Fumées de silice	9
I.3. 3. 4. Le laitier de haut fourneau	9
I.3.4 Produit semi-fini (Clinker)	10
I.3.4.2 Processus de la cuisson du clinker	11
I.4.Performances et composition chimique du clinker	12
I.5 Les formules de bogue	12
I.6 Procédure de fabrication du ciment	12
I.6.1. Principe de fabrication	12
I.6.2 Procèdes et technique de fabrication	13
I.6.2.1 Procèdes de fabrication	13
I.6.3 Technique de fabrication	14
I.6.3.1 Extraction	14

I.6.3.2 Concassage	15
I.6.3.3 Pré-homogénéisation	15
I.6.3.4 Préparation du cru	16
I.6.3.5 Zone de cuisson	16
I.6.3.5.1. Préchauffeur ou cyclones	16
I.6.3.5.2. Four rotatif	16
I.6.3.5.3. Refroidissement et le concassage	16
I.6.3.5.4. Stockage du clinker	17
I.6.3.6. Broyage du ciment	17
I.6.3.7. Stockage du ciment	17
I.6.3.8. Ensachage et expédition	17
I.7.Types de ciment	18
Chapitre II : Méthodes et caractérisations	
II. Méthode de contrôle de qualité	19
II.1. Principe de laboratoire	19
II.2. Fréquence d'analyses au laboratoire	19
II.3. Préparation des échantillons	19
II.3.1. Concasseur	19
II.3.2. Broyeurs à disques	20
II.4. Méthodes chimiques	21
II.4.1. Analyse par fluorescence RX :	21
II.4.2. Détermination de la chaux libre (CaOL)	23
II.4.2.1. La méthode référence (Compléxométrie)	23
II.4.2.2 La méthode routine (Acidimétrie)	23
II.4.3. Détermination de la perte au feu (PAF)	24
II.4.3.1. Définition	24
II.4.3.2. Principe	24
II.4.3.3. Mode opératoire	24
II.4.4. Détermination du pourcentage de (SO ₃) (la méthode référence)	25
II.4.5 Détermination l'humidité (%H ₂ O)	25
II.5.1 Détermination du pourcentage des refus	26
II.5.2 Taux de calcaire	26
II.5.3 Mesure de la surface spécifique par la méthode Blaine (SSB)	26
II.5.4 La consistance normale	27

II.5.5 Détermination du temps de prise	28
II.5.5.1 Détermination du temps début de prise	28
II.5.5.2 Détermination du temps fin de prise	28
II.5.6 Essais d'expansion	28
II.5.7 Essais mécaniques (flexion - compression)	29
II.5.7.1 Définition	29
II.5.7.2 Formulation des mortiers normalisés	29
II.5.7.3.2 Préparation des éprouvettes pour les essais mécaniques	29
II.5.8 Mesure La chaleur hydratation (EN196-9)	31
II.5.9 Test de combustibilité (Burnability)	32
II.5.9.1 Principe	32
II.5.9.2 Application	32
II.5.9.3 Équipement	32
II.5.9.4 Préparation des échantillons	33
II.5.9.5 Évaluation du test de combustibilité	33
Chapitre III : Généralité sur L'argile calcinée	
III-1. Introduction générale sur l'argile calciné	34
III-2. Définition de l'argile calciné	34
III-3. Historique de l'argile calcinée	34
III-4. Origine et nature des argiles utilisées :.....	35
III-5. Caractéristiques physico-chimiques de l'argile calcinée	35
III-5-1. Propriétés physiques	35
III-5-2. Propriétés chimiques	35
III-5-3. Réactivité chimique	36
III-6. Contexte et enjeux de l'industrie cimentière	36
III-7. Problèmes liés à la production de ciment (émissions de CO ₂ , consommation énergétique)	37
III-7-1. Les réactions chimiques (décarbonatation)	37
III-7-2. La combustion de combustibles fossiles	37
III-8. Intérêt des ajouts minéraux	38
III-8-1. Rôle des matériaux pouzzolaniques	38
III-9. Objectif de l'étude	39
III-10. Matières premières	39
III-10-1. Description de l'argile utilisée (composition, origine)	39
III-10-2. Procédé de calcination	40

III-10-3. Type de ciment de base	41
III-10-4. Caractéristiques principales du CEM I 52.5	41
Chapitre IV : Résultats et discussion	
IV- Résultats et discussion.....	42
IV-1-Introduction.....	42
IV-2-Mode opératoire	42
IV-3-Analyses physiques (granulométrie)	42
IV-4-Analyse chimiques	43
IV-4-1-Avant calcination	43
IV-4-2-Apres la calcination	44
IV-5-Choisir les échantillons d'argile calciné	50
IV-6-Préparation des mélanges (avec argile calcinée).....	50
IV-6-1-Analyse de mélange.....	51
IV-7-Caractérisations physiques.....	55
IV-7-1- Finesse et surface spécifique.....	55
IV-8-Essais mécaniques (résistance à la compression à 2, 7 et 28 jours)	56
IV-8-1-Dispositif expérimental	56
IV-8-2_Résultats des résistances à la compression (MPa)	56
IV-8-3-Interprétation des résultats	59
IV-8-4-Effets observés selon le taux d'argile calcinée	60
IV-8-5-Critères d'optimisation retenus	62
IV-8-6-Taux recommandé	62
IV-8-7- Effets observés selon La température d'argile calcinée	63
IV-8-8-Conclusion	66
Conclusion générale	67
Bibliographie	69
Résumés.....	72

Liste des tableaux

Tableau I-1 : Types de ciment	29
Tableau IV.1 : Pourcentage granulométries avant broyage.....	57
Tableau IV.2 : Pourcentage granulométries après broyage	58
Tableau IV.3 : Analyse par fluorescence X (XRF) avant calcination	58
Tableau IV.4 : Analyse par diffraction des rayons X (DRX) avant calcination	58
Tableau IV.5 : Analyse par fluorescence X (XRF) après calcination	60
Tableau IV.6 : Analyse par diffraction des rayons X (DRX) après calcination	63
Tableau IV.7 : Choix les échantillons d'argile calciné	65
Tableau IV.8 : Analyse par fluorescence X (XRF) de mélange	67
Tableau IV.9 : Analyse par diffraction des rayons X (DRX) de mélange	68
Tableau IV.10 : Finesse et surface spécifique de mélange	70
Tableau IV.11 : Résultats des résistances à la compression	72
Tableau IV.12 : Effets observés selon le taux d'argile calcinée	75
Tableau IV.13 : L'optimisation du taux de substitution	77
Tableau IV.14 : Effets observés selon la température d'argile calcinée	78

Liste des Figures

Figure I-1 : Ciments Lafarge CILAS	13
Figure I.2 : Grain du calcaire	15
Figure I.3 : Argile.....	16
Figure I.4 : Minerais de fer	16
Figure I.5 : Grain de sable	17
Figure I.6 : Grain de gypse	18
Figure I.7 : Grains de pouzzolane	19
Figure I-8 : Constituants de base du ciment	20
Figure I.9 : Procédé de fabrication du ciment Portland.....	24
Figure I.11 : Extraction la matière première	25
Figure I.12 : Concasseur	25
Figure I.13 : Hall de pré-homogénéisation	26
Figure I-14 : Four rotatif et préchauffage	27
Figure I.15 : Silo du clinker	27
Figure I-16 : expédition en sac	29
Figure I-17 : expédition en vrac	29
Figure II-1 : Concasseur	32
Figure II-2 : Broyeur à disque	32
Figure II.3 : Appareil XRF	33

Figure II.4 : Préparation des perles	34
Figure II.5 : Préparation des pastilles.....	35
Figure II-6 : Four 950 °C.....	37
Figure II.7 : Alpine de refus	38
Figure II.8 : Appareil de Blaine	39
Figure II.9 : Principe de fonctionnement de Blaine	39
Figure II.10 : Appareil de Vicat manuel	40
Figure II.11 : Moule le Chatelier	41
Figure II.12 : Malaxeur	43
Figure II.13 : Table à vibrante	43
Figure II.14 : Appareil de flexion et compression.....	43
Figure II-15 : Chambre d’humidité	43
Figure II-16 : Moule de 4 cm x 4cmx16cm.....	43
Figure II.17 : Appareil de chaleur hydratation	44
Figure IV.1 : Résistance 2J /témoin.....	73
Figure IV.2 : Résistance 7J /t.....	73
Figure IV.3 : Résistance 28J /témoin	73
Figure IV.4 : Résistance 2,7,28J /témoin	74
Figure IV.5 : Résistance 2J Vs% argile calcinée	76
Figure IV.6 : Résistance 7J Vs% argile calcinée	76
Figure IV.7 : Résistance 28J Vs% argile calcinée	76

Figure IV.8 : Résistance 2,7,28 J mélange 5% pendant 1 Heure.....	79
Figure IV.9 : Résistance 2,7,28 J mélange 5% pendant 3 Heures	79
Figure IV.10 : Résistance 2,7,28 J mélange 25% pendant 1 Heure.....	79
Figure IV.11 : Résistance 2,7,28 J mélange 25% pendant 3 Heures	80
Figure IV.12 : Résistance 2,7,28 J mélange 30% pendant 1 Heure.....	80
Figure IV.13 : Résistance 2,7,28 J mélange 30% pendant 3 Heures	80

Introduction générale

Introduction générale

L'industrie cimentière est devenue l'une des activités industrielles la mieux structurée et la mieux répartie [1]. Le ciment Portland ordinaire, qui contient de l'alite (C_3S) en tant que phase minéralogique majoritaire, est largement produit et utilisé dans le monde entier (4,6 Mds de tonnes en 2015). Cependant, la production de ciment portland ordinaire génère d'importants impacts environnementaux. Notamment le prélèvement de grandes quantités de ressources naturelles (argiles, calcaires et énergies fossiles) et le relargage de grandes quantités de dioxyde de carbone (0,95 tonne de CO_2 par tonne de ciment Portland). Ceci est dû à la décomposition du calcaire et la nécessité de cuisson du cru à une température élevée, entre 1450 et 1500°C [2].

La production de ciment génère ainsi environ 5% du total des émissions atmosphériques mondiales de gaz à effet de serre. L'industrie du ciment a élaboré de nombreuses stratégies pour limiter ces impacts : utilisation d'alternatives énergétiques et autres évolutions technologiques dans le procédé de cuisson permettant un meilleur rendement énergétique, ajout au clinker de diverses additions, naturelles ou recyclées ayant une activité hydraulique et/ou pouzzolanique [2].

L'utilisation de résidus, naturels ou industriels, dans un procédé de fabrication, permet en effet de résoudre en même temps les deux problèmes environnementaux suivants : un moindre impact sur les ressources naturelles et la valorisation matière de déchets [2].

L'argile calcinée est un matériau obtenu par la cuisson d'argiles naturelles à des températures modérées, généralement comprises entre 600 et 900 °C. Ce traitement thermique, appelé calcination, modifie la structure cristalline de l'argile, la rendant plus réactive sur le plan chimique. Utilisée depuis l'Antiquité, l'argile calcinée connaît aujourd'hui un regain d'intérêt, notamment dans le domaine de la construction durable, en tant qu'adjuvant ou substitut partiel au ciment Portland, réduisant ainsi l'empreinte carbone des bétons. L'étude de l'argile calcinée s'inscrit ainsi dans une démarche à la fois scientifique, technique et environnementale, visant à exploiter les ressources naturelles de manière plus responsable tout en répondant aux exigences de performance des matériaux modernes [3].

Cette étude vise à explorer le potentiel de l'argile calcinée en tant qu'additif cimentaire. L'objectif principal est d'évaluer l'influence de l'argile calcinée sur les propriétés physico-chimiques du ciment, afin de déterminer sa capacité à améliorer les performances du liant tout en réduisant son impact environnemental.

Ce mémoire s'articule sur quatre chapitres :

Le premier chapitre : est consacré aux généralités sur le ciment, et étapes de fabrication du ciment.

Le deuxième chapitre : présente la méthodologie d'étude utilisée. Les différents matériaux utilisés au cours de l'étude ainsi que les méthodes et essais utilisés pour déterminer les propriétés physiques mécaniques, et chimiques.

Le troisième chapitre : Généralités sur l'argile calcinée est l'objectif de calcination l'argile avec essentielle des Procédés de calcination pour obtenue des résultats efficaces est optimal.

Le quatrième chapitre : décrit tous les résultats obtenus dans le cadre des différents essais réalisés et des interprétations des résultats obtenus.

Ce travail se termine par une conclusion générale qui rappelle les principaux résultats obtenus.

Chapitre I : Etude bibliographie du ciment

I : Processus de fabrication du ciment

I.1.Description du fonctionnement de la cimenterie CILAS :

La société CILAS est un partenariat privé entre le Groupe Souakri 51% et le Groupe leader mondiale des matériaux de construction Holcim (Lafarge Algérie) avec 49%. Avec une capacité de 2,7 millions de tonnes par ans, la cimenterie CILAS Biskra est une usine de classe mondiale, dotée des dernières technologies de production et destinée principalement à alimenter le marché du sud algérien.

Le Groupe Souakri est un groupe algérien présent dans les activités des matériaux de construction, l'agriculture, logistiques & service, pharmacie, véhicules industriels et en production de mortiers et des ciments colle. Lafarge Algérie est le leader des matériaux de construction. Lafarge Algérie est présent sur toute la chaîne de valeur des matériaux de construction « Agrégats, Ciments, Mortiers, Granulats, Bétons, Plâtres, Sacs, Logistique et Distribution ». Lafarge Algérie possède 3 cimenterie : M'Sila, Oggaz, et Cilas à Biskra en partenariat avec le Groupe Souakri, pour une capacité totale annuelle de 11.5 Mt/an. L'activité Béton Prêt à l'Emploi opère 25 centres de production avec une capacité de plus de 1m Tonne/an. Lafarge Algérie emploie plus 4500 collaborateurs et est fortement engagée dans le développement économique, social et environnemental en Algérie [5].



Figure I-1 : Ciments Lafarge CILAS.

I.2.Définition de ciment :

Le ciment est un liant hydraulique, c'est-à dire un matériau minéral finement moulu qui, après avoir été gâché avec de l'eau, forme une pâte qui prend forme et durcit en raison de réactions et de processus d'hydratation. Même sous l'eau, le ciment conserve sa résistance et sa stabilité. Le ciment CEM, qui est conforme à l'EN 197-1, doit être capable de produire un mortier ou un béton qui conserve son ouvrabilité pendant un temps suffisamment long, doit atteindre des niveaux de résistance spécifiés et doit également présenter une stabilité de volume à long terme après des périodes déterminées.

L'hydratation des silicates de calcium est la principale cause du durcissement hydraulique du ciment CEM, mais d'autres composés chimiques, comme les aluminates, peuvent également participer au processus. La somme des quantités relatives d'oxyde de calcium (CaO) et des réactifs de dioxyde de silicium (SiO₂) doit avoir une proportion en masse au moins égale à 50 % selon l'EN 196-2 [6].

I.3 Constituants de base du ciment :

On peut théoriquement fabriquer du ciment portland à partir de matériaux quelconques renfermant chaux, silice, alumine et fer ; En pratique, les possibilités sont beaucoup plus limitées car on est obligé de choisir, pour des raisons évidentes, des matières premières faciles à extraire, traiter, et combiner.

On peut utiliser aussi comme appoint des sous-produits d'autres industries tels les laitiers de hauts fourneaux ou les cendres des centrales thermiques [7].

I.3.1. Matières Premières :

Les principaux constituants de ciment sont constitués d'un mélange naturel en proportion déterminé de calcaire (CaCO₃) et d'argile.

Parfois, on ajoute certaines matières de correction telles que le minerai de fer, le sable, la bauxite pour modifier respectivement les teneurs en oxyde de fer, en silice et oxyde d'alumine.

Le cru est préparé à l'état sec pour entrer dans le four sous forme de poudre que les cimentiers appellent fréquemment farine [8].

I.3.1.1. Calcaires :

Le calcaire est essentiellement constitué de carbonate de calcium qui existe à l'état pur sous de

variétés cristallisées de calcite et d'aragonite. On classe les calcaires comme suite [8] :

a. Calcaire Dur : On attribue ce nom au calcaire contenant un minimum de 80% en CaCO_3 et maximum de MgCO_3 . Le calcaire dur, renferme de faible proportion d'impureté de quartz, d'oxyde de fer. Les calcaires durs sont imperméables à l'eau [8].

b. Calcaire Mou (Craie) : La craie exploitée, par exemple, s'est formée il y a 80 millions d'années par l'accumulation de coquilles de plancton appelés coccolites. Les précipitations de (CaCO_3) ont cimenté ces organismes entre eux avec un peu d'argile et de silice. Le calcaire mou contient un maximum de 90% en (CaCO_3). Il est une variété de calcaire friable, les impuretés sont en proportion secondaires [8].



Figure I.2 : Grain du calcaire [9].

I.3.1.2. Argile :

L'argile recouvre toutes les petites particules formées par les processus d'érosion ou d'altération des roches, c'est-à-dire aussi bien du sable (SiO_2), des oxydes (comme l'oxyde ferrique Fe_2O_3 qui donne la couleur rouge à certains sols), des carbonates comme la calcite, que tout autre minérale. Les argiles peuvent être classées de plusieurs manières du point de vue minéralogique, on peut classer les argiles en différents groupes [1] :

- Groupe de l'halloysite : $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$
- Groupe de kaolin : $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
- Groupe de la montmorillonite : $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$
- Groupe des minéraux argileux micacés (séricite)
- Groupe des minéraux argileux magnésiens (sépiolite) [1].



Figure I.3 : Argile [9].

I.3. 2. Les matières corrections :

Des correcteurs, minéral de fer qui apporte Fe_2O_3 , bauxite pour Al_2O_3 , calcaire pour CaO , sable pour SiO_2 sont ajoutés pour atteindre la composition souhaitée du cru et le gypse (CaSO_4) [1].

I.3. 2. 1. Minéral de fer (Fe_2O_3)

Le fer est un métal commun qui se trouve dans la croûte terrestre, en combinaison avec d'autres éléments. Le minéral de fer est utilisé lorsque le roc est suffisamment riche pour être extrait de façon économique. Le minéral de fer donne du fer métallique (Fe) lorsqu'il est chauffé en présence d'un agent réducteur comme le coke. Le minéral de fer est habituellement composé d'oxydes et de carbonates de fer (voir Figure I.4) [10].



Figure I.4 : Minerais de fer [9].

I.3. 2. 2. Sable :

Elle se présente sous plusieurs formes [9]. :

a. Libre : elle ne peut se combiner et doit être éliminée si elle apparaît en nodules de silex ou de quartz, il peut en être autrement si elle se trouve finement divisée à l'état naturel et répartie dans la masse de calcaire [9].

b. Combinée : divers éléments tel que le fer, la magnésie, l'alumine, la silice et l'alumine déjà combinée sous forme d'argile réagissent bien avec la chaux [9].

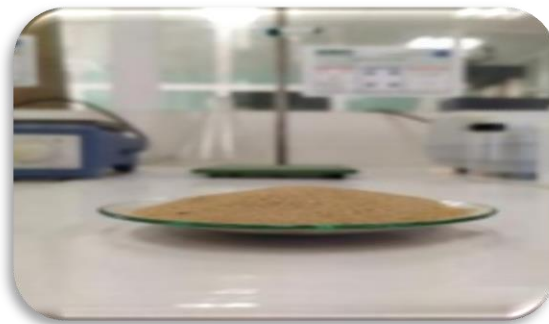


Figure I.5 : Grain de sable [9].

I. 3. 2. 3. Bauxite :

La bauxite contient de 40 à 60 % d'oxyde d'aluminium hydraté mélangé à de la silice et à de l'oxyde de fer. C'est ce dernier qui donne sa couleur rouge caractéristique à la bauxite [11].

I. 3. 2. 4. Gypse :

Est une espèce minérale composée de sulfate dihydraté de calcium de formule $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Le mot gypse désigne ainsi à la fois une espèce chimique et une roche.

Le gypse est le minéral qui permet de fabriquer le plâtre. Il entre aussi dans la composition des ciments. La mine de Naica permet de voir des cristaux géants de ce minéral dépassant 11 mètres de long [7].



Figure I.6 : Grain de gypse [9].

I. 3. 3. Les matières secondaires (Ajouts) :

I. 3. 3. 1. Pouzzolane :

Le terme couvre une série de matières naturelles de produit naturels caractérisés par une forte teneur en silice (50%) et l'aptitude à fixer la chaux en présence de l'eau à la température ambiante, pour formes des silicates et aluminates de calcium hydratés.

En association avec un ciment portland (ciment dégagement beaucoup de chaux hydratée lors de processus d'hydratation) la pouzzolane agit en fixant progressivement Cette chaux.

Ce faisant, elle accroît à long terme la résistance mécanique et améliore le comportement aux agents agressifs par la réduction de teneur en chaux libre.

En outre, la poudre très fine que constitue la pouzzolane, améliore l'imperméabilité en colmatant les capillaires (voir Figure I.7) [8].

On distingue deux types de pouzzolane [12] :

a. Pouzzolane naturelle :

Les pouzzolanes sont des matériaux siliceux ou silico-alumineux, qui ne possèdent pas eux-mêmes pas de propriétés liantes mais qui, sous forme finement divisée et en présence d'humidité, réagissent chimiquement avec l'hydroxyde de calcium à température ordinaire pour forme des composés possédant des propriétés liantes [12].



Figure I.7 : Grains de pouzzolane [8].

b. Pouzzolane artificielle :

C'est une matière essentiellement composée de silice, d'alumine et d'oxyde de fer ayant subi un traitement thermique pour lui assurer des propriétés pouzzolanique.

Les roches traitées thermiquement : argiles, schistes, latérite, bauxite et moler [13].

I. 3. 3. 2. Les fillers calcaires :

Les fillers calcaires sont des produits finement divisés. Obtenus par broyage des roches naturelles (calcaires, basalte, etc.), avec une teneur de carbonate de calcium CaCO_3 supérieure à 75%. Un filler est dit calcaire s'il contient au moins 90% de CaCO_3 , sinon il est désigné par le nom de sa roche d'origine [14].

I. 3. 3. 3. Fumées de silice :

Elles sont issues de la production de silicium métallique dans les fours à arc électrique. Elles forment des sphéroïdes qui se regroupent en agglomérats de quelques micromètres. La surface spécifique de ces fines est très élevée (10 à 20 m^2/g) [15].

I.3. 3. 4. Le laitier de haut fourneau :

Les laitiers des hauts fourneaux sont des sous-produits formés lors de l'élaboration de la fonte à partir de minerai de fer. On distingue trois sortes de laitiers [16] :

- Le laitier issu de minerai de fer, riche en phosphore, (laitiers, « T »).
- Le laitier issu de minerai de fer, pauvre en phosphore, (laitiers, « H »).
- Le laitier issu d'autres minerais de fer (laitiers « A »).
- Le laitier se compose principalement de silice (SiO_2), chaux (CaO), alumine (Al_2O_3) et d'oxyde de magnésium (MgO) [16].



Figure I-8 : Constituants de base du ciment [17].

I.3.4 Produit semi-fini (Clinker) :

Le Clinker, qui est un produit semi-fini, est obtenu après la cuisson à 1450 °C d'un mélange de calcaire CaCO_3 (~80 %) et d'argile (~20 %) dans un long four métallique isolé par des briques réfractaires. Ce processus de cuisson est appliqué à des matières premières telles que le calcaire, l'argile et les matières de correction. Le Clinker est alors produit sous la forme de petits nodules très durs, présentant des propriétés hydrauliques [8].

Dans la zone de clinkérisation du four, composition chimique du clinker [18] :

- Les compositions chimiques majeures : Chaux (CaO), Silice (SiO_2), Alumine (Al_2O_3) Ferrite (Fe_2O_3).
- Les compositions chimiques mineures : Magnésie (MgO), Alcalis (Na_2O et K_2O), soufre (SO_3), chlorure.
- Les compositions minéralogiques majeures : Silicate tricalcique C_3S (Alite), Silicate bicalcique C_2S (Bélite), Aluminate tricalcique C_3A , Aluminoferrite tétracalcique C_4AF
- Les compositions minéralogiques mineures : La chaux libre (CaOL), Sulfates alcalins [18].

I.3.4.1 Cuisson du clinker :

La cuisson est le processus de transformation de la farine crue en clinker, par un apport thermique suffisant, pour obtenir des réactions chimiques complètes conduisant à la formation des principaux composés de ce semi-produit (clinkérisation). Le procédé de cuisson (figure I.9) comporte un système de préchauffage du cru, une partie pour la décarbonatation, une partie pour la clinkérisation et un refroidisseur.

Le préchauffage de la farine crue, ayant un refus au tamis de 160 μm (de l'ordre de 1 à 1,5%) et une humidité de 8 à 9%, s'effectue dans la partie supérieure du préchauffeur à suspension (cyclones). La décarbonatation a lieu dans la partie basse du préchauffeur et la partie amont du four rotatif. La clinkérisation se fait toujours dans la partie aval du four rotatif. Les gaz chauds sont produits dans le four par combustion de charbon, de fioul, de gaz ou de tout produit à haut pouvoir calorifique, et proviennent également de processus de refroidissement du clinker en tant qu'un air secondaire [19].

I.3.4.2 Processus de la cuisson du clinker :

La cuisson du clinker passe par plusieurs étapes [9] :

a. **Séchage** : La température peut atteindre 100°C pour sécher les matières premières à l'air chaud et éliminer l'eau de la surface des particules [9].

1. **Préchauffage** : Avant d'entrer dans le four, la matière première est chauffée à environ 800 °C dans un échangeur de chaleur, qui est un poêle ou un réchauffeur en spirale. L'échangeur de chaleur se compose d'une série de quatre à cinq cyclones, où la poudre qui est déchargée au sommet descend vers l'entrée du four rotatif, et la matière froide qui a été introduite dans le four est chauffée. La partie supérieure, au contact des gaz diffusant à contre-courant d'un étage à l'autre, atteint alors un étage partiellement décarboné, atteignant le niveau inférieur à une température d'environ 800 °C [9].
2. **Calcination** : Il est possible de trouver des tours avec un foyer supplémentaire installé dans leur partie inférieure. Cette caractéristique est destinée à compléter le processus de décarbonatation de la farine qui atteint à ce stade des niveaux de 85 à 95 %. Cet équipement est communément appelé précalcinateur, et il en existe deux types [20] :
 - Un vrai préca qui est alimenté en air de combustion via une triple prise d'air vers le radiateur. Dans ce cas, 70% de la chaleur est transférée à le préca et 30% à la tuyère du four.
 - Faux pré-produit qui sont alimenté en air par les gaz émis du four (avec un excès O_2) en plus de l'air froid laissant passer 30% dans la préca et 70% dans la tuyère du four. C'est le cas de La Couronne [20].

b. **Refroidissement** : Un refroidisseur est un échangeur thermique dans lequel le clinker est collecté dans le four à une température de 1350°C, puis passe dans un refroidisseur qui a plusieurs fonctions. Ce dispositif vise à tremper et refroidir le clinker, à récupérer des thermis pour l'air de combustion et éventuellement un broyeur cru ou charbon [21].

I.4. Performances et composition chimique du clinker :

a. Facteur de saturation en chaux :

$$\text{LSF} = \frac{\text{CaO } 100}{2.8 \text{ SiO}_2 + 1.18 \text{ Al}_2\text{O}_3 + 0.65 \text{ Fe}_2\text{O}_3} \quad [22].$$

b. Module silicique :

$$\text{SM} = \frac{\text{SiO}_2}{\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3} \quad [22].$$

c. Module alumino-ferrique :

$$\text{AM} = \frac{\text{Al}_2\text{O}_3}{\text{Fe}_2\text{O}_3} \quad [22].$$

I.5 Les formules de bogue :

Les formules de bogue sont utilisées en mondial pour calculer les phases minéralogiques du clinker (C_3S , C_2S , C_3A , C_4AF) dépendent les oxydes principaux (C, A, S, F,) par les équations suivantes :

- $\text{C}_3\text{S} = (4,071 \times \text{CaO}) - (7,60 \times \text{SiO}_2) - (6,718 \times \text{Al}_2\text{O}_3) - (1,430 \times \text{Fe}_2\text{O}_3) \quad [22].$
- $\text{C}_2\text{S} = (8,60 \times \text{SiO}_2) + (5,068 \times \text{Al}_2\text{O}_3) + (1,079 \times \text{Fe}_2\text{O}_3) - (3,071 \times \text{CaO}) \quad [22].$
- $\text{C}_3\text{A} = (2,650 \times \text{Al}_2\text{O}_3) - (1,692 \times \text{Fe}_2\text{O}_3) \quad [22].$
- $\text{C}_4\text{AF} = 3,043 \times \text{Fe}_2\text{O}_3 \quad [22].$

I.6 Procédure de fabrication du ciment :

I.6.1. Principe de fabrication :

Le ciment Portland artificiel, le CPA, résulte du broyage du clinker avec environ 5% de gypse pour réguler la prise. Le clinker est une roche artificielle fabriquée en cuisson à une température de 1450 °C constitué le plus souvent d'un mélange d'environ 80% de calcaire (fournissant CaO) et d'environ 20% d'argile (fournissant SiO_2 , Al_2O_3 , et Fe_2O_3). La composition du cru, le mode de cuisson et le mode de refroidissement des clinkers peuvent varier considérablement les uns des autres. C'est-à-dire qu'en les broyant à différentes finesses avec des teneurs en gypse plus ou moins importantes, des ciments portland artificiels n'auront pas les mêmes qualités [23].

Elle comporte trois phases essentielles [24] :

- Extraction et préparation des matières premières
- Cuisson
- Broyage du clinker [24].

I.6.2 Procèdes et technique de fabrication :

I.6.2.1 Procèdes de fabrication :

Il y a quatre méthodes de fabrication existe dans milieu cimenterai sont [25] :

A. Procédé par voie humide (plus ancienne) :

Cette voie est utilisée depuis longtemps, la plus simple mais qui requiert le plus d'énergie. Dans ce procédé, le calcaire et l'argile sont broyés finement et mélangés avec l'eau de façon à constituer une pâte assez liquide (environ 42 % d'eau). On brasse énergiquement cette pâte dans de grands bassins de 8 à 10 mètres de diamètres. Elle est continuellement malaxée et homogénéisée, ce mélange est appelé le cru. Des analyses chimiques permettent de contrôler et d'apporter les corrections nécessaires avant sa cuisson. La pâte est ensuite acheminée à l'entrée d'un four rotatif.

Le clinker, à la sortie du four, passe dans des refroidisseurs pour subir une trempe. Quelle que soit la méthode de fabrication, à la sortie du four, on obtient un même clinker qui est encore chaud [25].

B. Procédé par voie semi-humide :

Dans la voie semi-humide, la pâte est d'abord débarrassée de son eau dans des filtres presses. Le gâteau de filtre-pressé est ensuite extrudé sous forme de granules et introduit dans un préchauffeur à grilles ou directement dans un sécheur pour la fabrication du cru [9]

C. Procédé par voie semi-sèche :

Dans la voie semi-sèche, la farine mélangée à de l'eau forme des granules qui sont introduites dans un préchauffeur à grilles situé en amont du four ou dans un four long équipé de croisillons [9]

D. Procédé par voie sèche (plus utilisée) :

La matière première broyée et séchée passera d'abord dans un préchauffeur à cyclone avec ou sans précalcinateur (de type AT 'air- through' ou AS 'air séparé'), puis dans un four tubulaire de 80 m. C'est le procédé le plus récent et le plus répandu car il est moins énergivore, mais il nécessite la mise en

œuvre de moyen important de captation des poussières (électro filtres, filtres cyclones et multi cyclones, dépoussiéreurs électrostatiques...) [26]

I.6.3 Technique de fabrication :

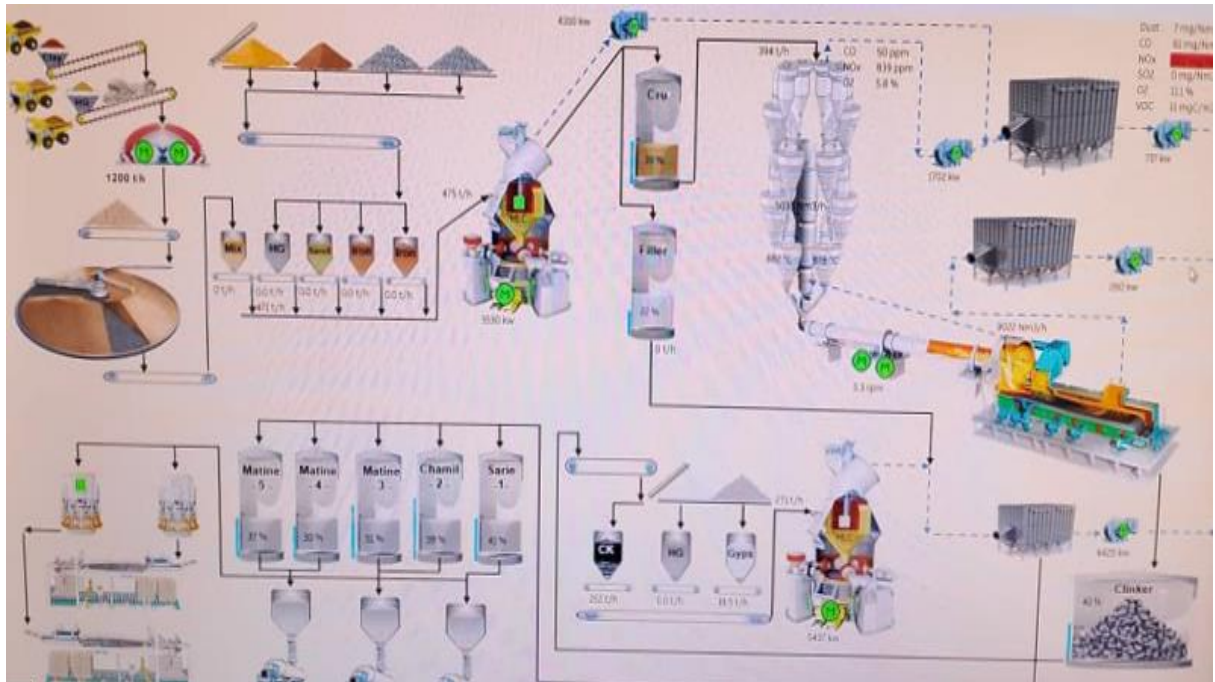


Figure I.9 : Procédé de fabrication du ciment Portland.

I.6.3.1 Extraction :

Les matières premières sont extraites de carrières à ciel ouvert par abattage ou ripage [27] :

Ces matières premières sont extraites des parois rocheuses par abattage à l'explosive ou à la pelle mécanique, ou par ripage au bulldozer [28].

- Les matières premières qui apportent les oxydes nécessaires pour synthétiser le clinker sont extraites de carrières.
- Les matières premières sont extraites au niveau de carrière sous forme de blocs de dimensions très variées.
- L'extraction consiste à extraire du calcaire et de l'argile à partir de carrière à ciel ouvert.



Figure I.11 : Extraction la matière première. [18].

I.6.3.2 Concassage : Les matériaux passent dans un concasseur pour les réduire à une taille inférieure à 80 mm [29].

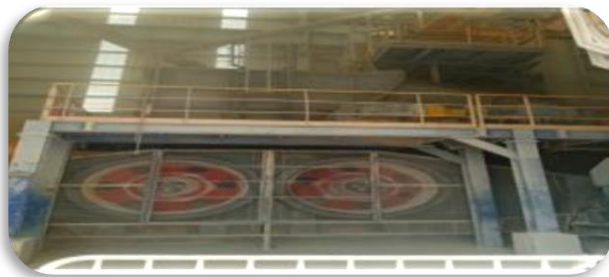


Figure I.12 : Concasseur. [18].

I.6.3.3 Pré-homogénéisation : Les matériaux sont disposés en couches horizontales superposées dans un hall puis repris verticalement pour obtenir un mélange homogène [29].

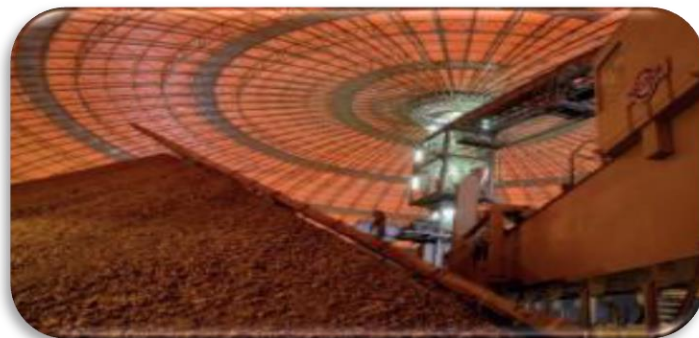


Figure I.13 : Hall de pré-homogénéisation [20].

La matière crue est reprise dans les tas de pré-homogénéisation par des roues-pelles la pré-homogénéisation de la matière première se fait à l'aide d'un bras râteau, tournant autour d'un axe dans un hall [9].

I.6.3.4 Préparation du cru :

La préparation du cru consiste à mélanger uniformément le calcaire et l'argile dans des proportions établies en fonction de leurs compositions chimiques spécifiques, mais toujours dans des proportions proches de 80 % calcaire pour 20 % argile [30].

I.6.3.5 Zone de cuisson :

La ligne de cuisson est constituée de :

I.6.3.5.1. Préchauffeur ou cyclones :

Les gaz réchauffent la poudre crue qui circule dans les cyclones en sens inverse, par gravité. La poudre s'échauffe ainsi jusqu'à environ 800 °C et perd donc son gaz carbonique (CO₂) et son eau. C'est un échangeur à contre-courant destiné à préchauffer la farine avant son entrée dans le four [7].

I.6.3.5.2. Four rotatif :

Le four est composé d'une virole cylindrique de 90 mètres de long et de 5,6 mètres de diamètre, protégée par de la brique réfractaire et inclinée de 1 à 4 degrés. À l'extrémité supérieure, le mélange cru est chargé, tandis que le combustible et l'air comburant sont brûlés à l'extrémité inférieure [7].



Figure I-14 : Four rotatif et préchauffage [20].

I.6.3.5.3. Refroidissement et le concassage :

Le clinker obtenu subit à la sortie du four un refroidissement brusque et ramenant sa température d'environ 1200 °C à 100 °C. Cette opération, qui s'accompagne de la transformation de la structure cristalline du matériau, donne naissance à des blocs durs et grossiers de matière [31].

I.6.3.5.4. Stockage du clinker :

Le clinker refroidit à 100°C est transporté et stocké dans un hall de plusieurs dizaines de milliers de tonnes, permettant ainsi d'assurer une continuité de la production du ciment, y compris lors des arrêts de la ligne de cuisson pour la maintenance annuelle, par exemple [27].



Figure I.15 : Silo du clinker [9].

I.6.3.6. Broyage du ciment :

Le ciment est constitué de clinker, de gypse et de calcaire, comme nous l'avons déjà mentionné. Que ce soit dans le hall des ajouts ou dans le silo de clinker, tous sont transportés par des bandes ou des chaînes métalliques afin de remplir les différentes trémies de chargement pour le dosage avant d'être broyés. Le broyeur est équipé de boulets de différentes tailles afin de produire de la farine très fine. De cette manière, les 10 silos de ciment collectent le ciment prêt à être ensaché puis livré en vrac [31].

I.6.3.7. Stockage du ciment :

Le ciment est stocké dans des silos d'une capacité de plusieurs milliers de tonnes, qui peuvent être parfois divisés en plusieurs compartiments, pour stocker différents types de ciment [27].

I.6.3.8. Ensachage et expédition :

Le produit disponible en sacs ou en vrac est commercialisé de deux manières différentes



Figure I-16 : expédition en sac [23].



Figure I-17 : expédition en vrac [10].

I.7.Types de ciment :

Le ciment est classé en différentes catégories en fonction de la proportion des matières qui le composent [32].

Tableau I-1: Types de ciment [32]

TYPE	NOTATION	CLINKER	AUTRES CONSTITUANTS	CONSTITUANTS SECONDAIRES
Ciment portland	CEM I	95-100	---	0-5
Ciment portland composé	CEM II A	80-94	6-20	---
	CEM II B	65-79	21-35	---
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
Ciment pouzzolanique	CEM IV A	65-90	10-35	0-5
	CEM IV B	45-64	36-55	0-5
Ciment composé	CEM V A	40-64	18-30	0-5
	CEM V B	20-39	31-50	0-5

Chapitre II : Méthodes et caractérisations

II. Méthode de contrôle de qualité :**II.1. Principe de laboratoire :**

Le travail dans le laboratoire, consiste à contrôler la qualité de produit tout au long du processus de la fabrication depuis les matières premières jusqu'au produit fini. En emportant des échantillons à analyser pour connaître les compositions chimiques existantes et leurs pourcentages [33].

II.2. Fréquence d'analyses au laboratoire :

- a. Contrôle de la matière cru chaque 2 heures.
- b. Contrôle de clinker chaque 2 heures.
- c. Contrôle de ciment chaque 2heures.
- d. Contrôle d'alimentation de four 3 fois / jour.
- e. Contrôle de matière chaud 3 fois / jour.
- f. Contrôle de matières premières 1 fois / semaine [33].

II.3. Préparation des échantillons :

Pour effectuer l'analyse, la taille de l'échantillon doit d'abord être réduite en utilisant [33] :

II.3.1. Concasseur :

Il décompose les grosses matières premières ou le clinker pour faciliter le processus de broyage dans les broyeurs à disques [33]



Figure II-1 : Concasseur

II.3.2. Broyeurs à disques :

❖ Principe :

Le principe de broyage à disque fait suivant les quatre étapes [33] :

1. Après le concassage des échantillons du clinker avec un diamètre inférieur à 3 mm
2. On met une quantité d'échantillon dans le disque pesant 150 g.
3. On choisit « program 1 » pour notre essai "clinker".
4. Programme 1= 1200 tour/min pendant 2 minute, afin de rendre les granulés fins [33]



Figure II-2 : Broyeur à disque.

II.4. Méthodes chimiques :

Les méthodes analyse chimique utilisées au niveau de la cimenterie de CILAS, sont effectuées selon la norme européenne «196-2 » [33].

II.4.1. Analyse par fluorescence RX :

La spectrométrie de Fluorescence X (SFX ou FX) ou en anglais X Ray Fluorescence (XRF) est une technique d'analyse élémentaire qui permet de :

A. Qualifier les éléments chimiques présents dans un échantillon c'est-à-dire connaître les éléments constituant l'échantillon (exemple : Calcium, Silicium, Aluminium, Fer...).

B. Quantifier les éléments présents c'est-à-dire connaître leur teneur (exemple : 70% de calcium, 8% de silicium...) [34].



Figure II.3 : Appareil XRF.

Pour faire les analyses avec les RX, on utilise soit des perles soit des pastilles [33] :

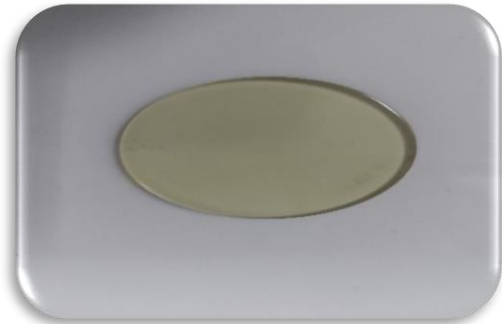
➤ Préparation des perles :

1. L'échantillon de clinker doit d'abord être broyé dans un concasseur.
2. Ensuite, broyez-le à l'aide d'un broyeur à disques.

3. Placez 2 g d'échantillon dans un creuset et placez-le dans une étuve à 950°C pendant une heure. Ensuite, retirez-le pour refroidir pendant 20 minutes.
4. Ensuite, dans un creuset en platine, 1 gramme d'échantillon est mélangé avec 7 grammes de fondant (Di-Lithium Tetraborate).
5. Ensuite, mélangez manuellement le mélange pour qu'il soit homogène.
6. Le creuset est placé dans le creuset pendant 24 minutes à une température de 1200°C.
7. À l'aide du programme correspondant à l'échantillon à analyser, la perle est insérée dans l'appareil à rayons X pour analyse [33].



Peleuse



Perle

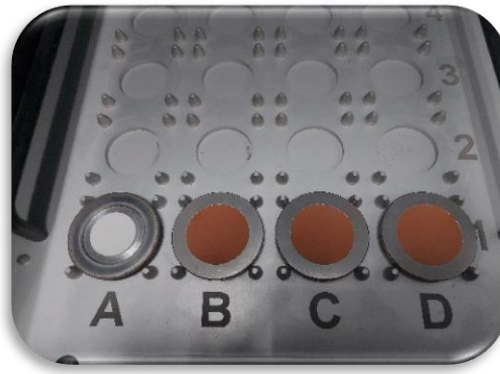
Figure II.4 : Préparation des perles

➤ **Préparation des pastilles :**

1. L'échantillon de clinker doit d'abord être broyé dans un concasseur.
2. Ensuite, broyez-le à l'aide d'un broyeur à disques.
3. Ensuite, mettez 10 g d'échantillon broyé dans l'APM.
4. Insérez les granulés dans la machine XRF.
5. Lire les résultats en ligne [33].



APM



Pastilles

Figure II.5 : Préparation des pastilles**II.4.2. Détermination de la chaux libre (CaOL) :**

C'est l'un des éléments les plus importants du clinker, il y a deux façons de le définir [18] :

II.4.2.1. La méthode référence (Complexométrie) :

Introduire 2g d'échantillon à analyser, dans un bécher sec de 100 ml. On l'ajoute 25 ml d'éthylène glycol, et on agite la solution pendant 30 sec, puis le bécher est placé dans l'étuve à environ de 110°C, pendant 10min.

La solution est filtrée dans l'ensemble de filtration sous vide, la fiole doit préalablement contenir : 200 ml d'eau déminéralisée, 5 ml de Hl et quelques gouttes d'indicateur de méthylorange, on ajoute 4 ml d'ammoniaque et ajoute la solution de NaOH jusqu'à l'obtention d'un PH = $13,0 \pm 0,5$, On verse ensuite 15 ml de triéthanolamine.

Le réactif de calconcarboxylique jusqu'à l'obtention d'une franche coloration rose violacé.

On titre avec E.D.T.A (éthylène diamine tétra acétique) jusqu'au la disparition complète de la couleur bleu turquoise consignez la valeur V_{EDTA} [18].

$$\%CaOL = \frac{C_{EDTA} * V_{EDTA} * 56.08 * 100}{m_{éch} * 1000}$$

II.4.2.2 La méthode routine (Acidimétrie) :

Nous pesons 1 g de l'échantillon et le mettons dans une fiole, y ajoutons 40 ml d'éthylène glycol et agitons bien [20].

Mettez-le au four pendant une minute et demie à une température de 110°C et nous filtrons la solution, une fois terminé, nous versons des gouttes de bleu de méthylène et nous l'étalonnons avec de l'acide chlorhydrique 0,5 M jusqu'à ce que la couleur vire au vert et nous enregistrons la valeur V_{HCL} [20]

$$\%CaOL = (V_{HCL1} - V_{HCL2}) \times F_{HCL}$$

F_{HCL} : Facteur d'acide chlorhydrique, la plupart du temps sa valeur 0.3 [20].

II.4.3. Détermination de la perte au feu (PAF) :

II.4.3.1. Définition :

La perte par le feu est définie comme le pourcentage de matière enlevée lors de la calcination à l'air à partir d'un échantillon [8].

II.4.3.2. Principe :

En réalisant la calcination à l'air, le gaz carbonique et l'eau sont volatilisés. De plus, tous éléments oxydables éventuellement présents peuvent être oxydés [8].

II.4.3.3. Mode opératoire :

Le pourcentage de H_2O , CO_2 dégagé lors la calcination est mesurée selon le protocole expérimental suivant:

On prend et pèse un creuset en platine vide et propre on met de 2 g matière (P_1), qui est ensuite entrée le creuset en four électrique 950°C pour mesurer la décarbonatation, après 1 heure sort la matière et attend quelques minutes pour refroidir et pèse le creuset (P_2) [33].

➤ **Remarque :** La même technique dans 550°C pour calculer déshydratation.

La PAF déterminée sous forme suivante :

$$\%PAF = \frac{(P_1 - P_2)}{2} \times 100$$

P_1 : Poids de creuset vide et 1g de la matière avant la décarbonatation.

P_2 : Poids de creuset et matière après la décarbonatation [33].



Figure II-6 : Four 950 °C.

II.4.4. Détermination du pourcentage de (SO₃) (la méthode référence) :

Peser 0.2g de la matière (ciment) dans un bécher 250 ml, ajouter 50 ml de l'eau distillé et 5 ml de l'acide chlorhydrique à 50% porter sur une plaque chauffante jusqu' à l'attaque complète (Coloration jaune) ; Ajuster jusqu'à 200 ml avec l'eau distillé et laisser refroidir dans un bain-marie. Mettre le bécher sur un agitateur magnétique et ajouter une cuiller de chlorure de baryum BaCl₂ (Saturation de la solution). Une fois tout le BaCl₂ est dissout remplir la cellule de l'appareil turbidimètre jusqu' au trait, lire la valeur affichée en NTU et faire la conversion en %SO₃ dans le tableau correspondant [33].

II.4.5 Détermination l'humidité (%H₂O) :

On prend et peser un plat vide et propre on met de 10g matière P1, entrée le plat en sécheur 110° C pour mesurée la déshydratation dans les matières premières, après 8 heures sorte la matière et pesez le plat P2.

$$\%H_2O = \frac{P1-P2}{10} \times 100$$

P1 : Poids de matière avec plat.

P2 : Poids de P1 après le séchage (sans H₂O) [33].

II.5 Les méthodes physico-mécaniques :

Les appareils dans ces essais conformes aux normes européennes 196-1

II.5.1 Détermination du pourcentage des refus :

La détermination du pourcentage des refus de matière se fait après le broyage, les refus déterminent et contrôlent l'état de fonctionnement du broyeur et le degré du broyage.

On pèse 10 g de l'échantillon puis verse dans un tamis de 45 µm ou 90 µm pendant 2 minutes. Les particules restantes au-dessus du tamis représentent le pourcentage de refus.

Pour calculer le refus par la formule suivant :

$$\text{Refus} = \frac{m_2}{m_1} \times 100\%$$

m1 : masse de matière

m2 : masse de matière après le tamisée



Figure II.7 : Alpine de refus [9]

II.5.2 Taux de calcaire :

C'est un paramètre obtenu après calculer la perte au feu (PAF) de ciment.

II.5.3 Mesure de la surface spécifique par la méthode Blaine (SSB) :

L'appareil utilisé pour déterminer la finesse de mouture de ciment est appelé « Perméable mètre de Blaine ».

Cet appareil est schématisé sur (Figure II-8).

Il se compose pour l'essentiel d'une cellule dans laquelle est placé le ciment à tester et d'un

manomètre constitué d'un tube en verre en forme de U rempli, jusqu'à son repère inférieur (N° 4) d'une huile légère.

La cellule est équipée d'une grille en sa partie inférieure.

Un piston sert à tasser le ciment dans la cellule sous un volume V défini [36].



Figure II.8 : Appareil de Blaine.

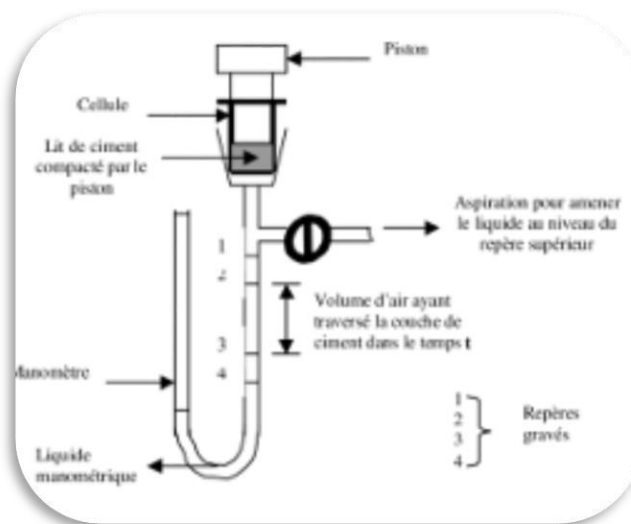


Figure II.9 : Principe de fonctionnement de Blaine [9].

II.5.4 La consistance normale :

C'est la détermination de la consistance normalisée de la pâte de ciment selon les spécifications de la norme européenne EN 196-3.

Dans cet essai, la consistance est caractérisée par le temps que met le mortier pour s'écouler sous l'effet de la vibration.

II.5.5 Détermination du temps de prise :

C'est la détermination du temps de prise du ciment selon les spécifications de la norme européenne EN 196-3.

II.5.5.1 Détermination du temps début de prise :

Le temps de début prise correspond à la lecture de 6 ± 3 mm noté à partir du temps zéro.

II.5.5.2 Détermination du temps fin de prise :

Le temps de fin de prise correspond à la lecture de 0,5 mm noté à partir du temps zéro. [37]

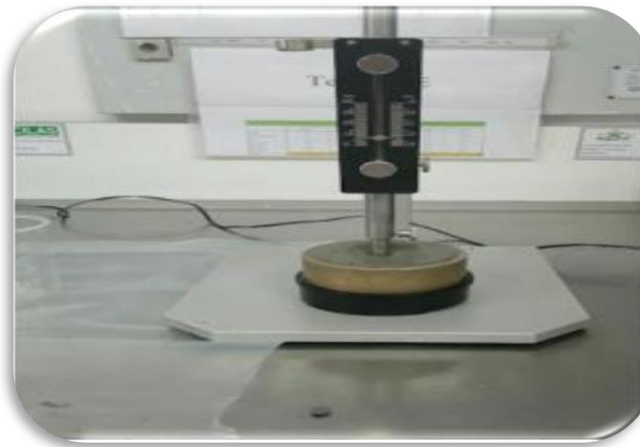


Figure II.10 : Appareil de Vicat manuel

II.5.6 Essais d'expansion :

Le ciment étudié est gâché à la consistance normale déterminée selon la norme EN196-3, puis introduit à l'intérieur de petits moules cylindrique (en métal élastique résistance la corrosion) et maintenu entre deux plaques de verre.

Ces moules fondus selon on génératrice son munis verticalement de deux aiguilles de 15 cm qui amplifient 10 fois la mesure de déformation ils sont immédiatement places en armoire ayant une humidité relative ≥ 90 % et une température 20 ± 1 pendant 24 ± 0.5 heures on mesure alors écartement initial. L'essai expositions peut-être effectuer à froid au suivant la méthode normalisée, à chaud l'écartement final est alors mesuré après 3 heures d'ébullition [9].



Figure II.11 : Moule le Chatelier.

II.5.7 Essais mécaniques (flexion - compression) :

II.5.7.1 Définition :

Leur objectif de mesurer les résistances aux différentes contraintes au bout d'un certain temps, par le biais des essais de flexion et de compression permettent de déterminer la contrainte de rupture à la traction par flexion et la compression des liants hydrauliques [18].

II.5.7.2 Formulation des mortiers normalisés :

Le mortier est constitué par le mélange suivant

A. 1350g sable normalisé (Norme EN 196-1).

B. 450 g du ciment.

C. 225 g l'eau de gâchage (l'eau distillé).

II.5.7.3 Essais sur mortier :

II.5.7.3 .1 Mortier normalisé :

Des éprouvettes contenant un mélange de ciment Portland ont été coulées selon les normes EN 196-3 et EN 196-1 afin de vérifier la progression de la résistance mécanique [18].

II.5.7.3.2 Préparation des éprouvettes pour les essais mécaniques :

♦ Verser 225 g d'eau dans le récipient du malaxer et ajoutez 450 g de ciment

- ♦ Mettre le malaxeur en marche à la vitesse lente pendant une minute dans les 30 derniers seconds puis introduire 1350 g de sable normalisé sec.
 - ♦ Mettre le malaxeur à la vitesse lente pendant 30 secondes après arrêter le mouvement pendant 90 seconds, reprendre le mélange pendant 2 mn à la vitesse rapide.
 - ♦ Ensuite, mélange est versé dans le moule à l'aide d'une spatule, et peut être bien tassé, après un doublé de choc en utilisant l'appareil à choc.
 - ♦ Le mortier est mis dans la chambre humide à température (20 ± 1) °C et 90% d'humidité et étiqueter les moules pour identification F
 - ♦ Après 24 heures, on fait le démoulage et on conserve les éprouvettes dans le bain d'eau.
 - ♦ L'éprouvette pour 2 jours, éprouvette pour 7 jours et éprouvette pour 28 jours.
 - ♦ Versez le mortier dans un moule à l'aide d'une spatule et tassez-le bien à l'aide d'un appareil à choc.
 - ♦ Placez le moule dans une chambre humide à une température de (20 ± 1) °C et à une humidité de 90%.
- Pour les moules étiqueter l'identification.
- ♦ Après 24 heures, retirez le moule et conservez les éprouvettes dans de l'eau.
 - ♦ Laissez une éprouvette pour 2 jours, pour 7 jours et pour 28 jours [18].



Figure II.12 : Malaxeur.



Figure II.13 : Table à vibrante.



Figure II.14 : Appareil de flexion et compression.



Figure II-15 : Chambre d'humidité [20].



Figure II-16 : Moule de 4 cm x 4cmx16cm

II.5.8 Mesure La chaleur hydratation (EN196-9) :

La présente Norme européenne décrit une méthode de mesure de la chaleur d'hydratation des ciments par calorimétrie semi-adiabatique, dite méthode de La gavant. L'essai a pour but démesurer en continu la chaleur d'hydratation du ciment au cours des tout premiers jours. La chaleur d'hydratation est exprimée en joules par gramme de ciment.

La méthode semi-adiabatique consiste à introduire un échantillon de mortier fraîchement préparé, dans un calorimètre afin de déterminer, d'après l'évolution de la température, la quantité de chaleur dégagée. À une échéance donnée, la chaleur d'hydratation du ciment contenu dans l'échantillon est égale

à la somme de la chaleur accumulée dans le calorimètre et de la chaleur dissipée vers le milieu ambiant pendant toute la durée de l'essai [38].



Figure II.17 : Appareil de chaleur hydratation [9].

II.5.9 Test de combustibilité (Burnability) :

II.5.9.1 Principe :

La combustibilité d'un mélange cru est définie comme la facilité de formation des minéraux du clinker et est - par convention - exprimée par la teneur en chaux non combinée (CaOL) dans le clinker restant après chauffage dans des conditions données (durée et chaleur).

Le test de combustibilité Lafarge Holcim est réalisé à température constante de 1400°C (pas de rampe de chauffage ; le four est préchauffé à 1400°C) pendant 19 minutes [3].

II.5.9.2 Application :

Alimentation du four (éventuellement corrigée pour l'incorporation de cendres de combustible avec des correctifs finement broyés pour obtenir les mêmes modules de clinker que dans les conditions de l'usine) et mélanges de laboratoire [3].

II.5.9.3 Équipement :

- ♦ Four électrique à chargement par le bas Carbolite BLF 17/3.
- ♦ Four de séchage.
- ♦ Outil de moulage pour la préparation de comprimés d'échantillons.
- ♦ Spatule, tige de verre et pince à creuset.
- ♦ Creusets en platine avec couvercle.

♦. Eau déminéralisée.

II.5.9.4 Préparation des échantillons :

Mélanger petit à petit 50 g d'échantillon dans un bol en céramique avec de l'eau déminéralisée (typiquement 13,5-13,8 g) et agiter avec la spatule pour obtenir une pâte homogène et transformable. Pressez la pâte avec la spatule dans l'outil de moulage et retirez l'excédent de pâte afin que la surface des cylindres de pâte soit plate et lisse. Placez l'outil de moulage dans l'étuve pendant min. 6 h à 105°C (mieux toute la nuit). Après séchage à 105°C, les pellets du mélange cru sont extraits du moule avec une tige de verre [3].

II.5.9.5 Évaluation du test de combustibilité :

Comme le confirme l'expérience, le CaOL non combiné restant donne une indication fiable, quoique relative, de la facilité de combustion d'un mélange brut à laquelle on peut s'attendre dans les conditions de l'usine [3].

L'évaluation des résultats du test de combustibilité Lafarge Holcim est effectuée sur la base suivante :

Tableau II .1 : Évaluation de combustibilité [3].

Gamme CaOL	Combustibilité
0→2%	Très bien
2→4%	Bien
4→6%	Modéré
6→8%	Pauvre
Au-dessus de 8%	Très pauvre

Chapitre III : Généralité sur L'argile calcinée

III-1. Introduction générale sur l'argile calciné :

L'argile calcinée est un matériau obtenu par la cuisson d'argiles naturelles à des températures modérées, généralement comprises entre 600 et 900 °C. Ce traitement thermique, appelé **calcination**, modifie la structure cristalline de l'argile, la rendant plus réactive sur le plan chimique. Utilisée depuis l'Antiquité, l'argile calcinée connaît aujourd'hui un regain d'intérêt, notamment dans le domaine de la construction durable, en tant qu'adjuvant ou substitut partiel au ciment Portland, réduisant ainsi l'empreinte carbone des bétons.

Grâce à ses propriétés pouzzolaniques, c'est-à-dire sa capacité à réagir avec la chaux en présence d'eau pour former des composés cimentaires, l'argile calcinée est un ingrédient clé dans le développement de matériaux de construction écologiques. Elle est également utilisée dans d'autres secteurs, tels que la céramique, la purification de l'eau, ou encore l'agriculture, en raison de sa porosité, sa surface spécifique élevée, et sa stabilité chimique.

L'étude de l'argile calcinée s'inscrit ainsi dans une démarche à la fois scientifique, technique et environnementale, visant à exploiter les ressources naturelles de manière plus responsable tout en répondant aux exigences de performance des matériaux modernes [3]

III-2. Définition de l'argile calciné :

L'argile calcinée est une argile chauffée à haute température pour la rendre chimiquement réactive, notamment dans des applications comme la fabrication de ciments ou de matériaux céramiques.

L'argile calcinée est une argile naturelle qui a été chauffée à haute température, généralement entre 600 °C et 900 °C, dans un processus appelé calcination. Cette transformation thermique modifie sa structure cristalline et chimique, ce qui lui confère de nouvelles propriétés intéressantes [39].

III-3. Historique de l'argile calcinée :

L'utilisation de l'argile calcinée remonte à l'Antiquité, où les civilisations comme celles d'Égypte et de Mésopotamie utilisaient déjà l'argile chauffée pour fabriquer des briques et des poteries plus résistantes. Bien que le concept de calcination n'était pas encore formalisé, les Romains exploitèrent des matériaux naturels aux propriétés similaires, comme la pouzzolane, pour produire des bétons durables. Ce n'est qu'au XIXe siècle, avec le développement du ciment Portland, que l'intérêt scientifique pour les ajouts pouzzolaniques se généralise, notamment avec l'introduction du kaolin calciné. Au XIXe siècle, les avancées en chimie des matériaux ont permis d'identifier la métakaolinite, issue de la calcination du kaolin, comme une phase très réactive et utile dans les ciments et bétons. Aujourd'hui, dans un contexte de transition écologique, l'argile calcinée est au cœur de recherches visant

à réduire l'empreinte carbone des matériaux de construction, notamment à travers des technologies innovantes comme le ciment LC3 (Limestone Calcined Clay Cement) [4].

III-4. Origine et nature des argiles utilisées :

Les argiles sont des matériaux naturels composés essentiellement de minéraux phyllosilicates, comme la kaolinite, l'illite ou la montmorillonite. Pour la calcination, les argiles les plus couramment utilisées sont les argiles kaoliniques, car elles développent d'excellentes propriétés pouzzolaniques après traitement thermique. L'origine géologique et la composition chimique influencent fortement la qualité du produit calciné obtenu [40]

III-5. Caractéristiques physico-chimiques de l'argile calcinée :

Généralement après la calcination du kaolin ou d'autres argiles courantes [4] :

III-5-1. Propriétés physiques :

- Aspect : poudre fine, généralement blanche à rose pâle selon les impuretés (fer, titane).
- Granulométrie : particules très fines (souvent $< 45 \mu\text{m}$), parfois broyées pour augmenter la réactivité.
- Surface spécifique : élevée (jusqu'à $15\text{--}25 \text{ m}^2/\text{g}$ selon BET), ce qui favorise les réactions chimiques.
- Densité apparente : environ $2,6$ à $2,8 \text{ g/cm}^3$.
- Porosité : relativement faible, mais suffisante pour adsorber l'eau et interagir avec la matrice cimentaire.

III-5-2. Propriétés chimiques :

- Composition chimique typique :
 - ❖ SiO_2 (dioxyde de silicium) : $50\text{--}60 \%$
 - ❖ Al_2O_3 (oxyde d'aluminium) : $30\text{--}40 \%$
 - ❖ Fe_2O_3 , TiO_2 , K_2O , MgO , etc. (en faibles quantités)
- Perte au feu (LOI) : très faible ($< 5 \%$), la majeure partie de l'eau structurale ayant été éliminée.
- PH : légèrement alcalin à neutre ($6,5\text{--}8$), compatible avec les systèmes cimentaires.
- Pouvoir pouzzolanique : très élevé, dû à la formation de métakaolinite, une phase amorphe et très réactive formée entre 600°C et 850°C

III-5-3. Réactivité chimique :

- Réagit avec les hydroxydes de calcium (Ca(OH)_2) dans les ciments pour former des produits de type C-S-H et C-A-H, contribuant à la résistance mécanique et à la durabilité.
- Capacité à piéger certains ions métalliques ou à interagir avec des polluants (utile aussi en environnement) [4].

III-6. Contexte et enjeux de l'industrie cimentière :

L'industrie cimentière joue un rôle central dans le développement des infrastructures modernes. Le ciment, composant essentiel du béton, est le matériau de construction le plus utilisé au monde. Cependant, sa production est énergivore et fortement émettrice de gaz à effet de serre, notamment en raison de la calcination du calcaire (CaCO_3) en clinker, qui libère une quantité significative de CO_2 .

Selon l'Agence Internationale de l'Énergie (AIE), l'industrie du ciment est responsable d'environ 7 à 8 % des émissions mondiales de CO_2 . En plus des impacts environnementaux, la fabrication du clinker nécessite une consommation importante d'énergie thermique, principalement issue de combustibles fossiles. Ces enjeux environnementaux et économiques poussent aujourd'hui les acteurs du secteur à rechercher des alternatives durables permettant de réduire l'empreinte carbone du ciment sans compromettre ses performances techniques.

Parmi les stratégies adoptées, la substitution partielle du clinker par des matériaux cimentaires secondaires (MCS), tels que les cendres volantes, les laitiers de haut-fourneau ou les argiles calcinées, est l'une des plus prometteuses. Ces matériaux, souvent d'origine naturelle ou industrielle, peuvent participer aux réactions d'hydratation et contribuer à améliorer certaines propriétés mécaniques et chimiques du ciment.

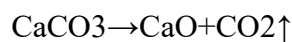
Dans ce contexte, l'argile calcinée apparaît comme une solution innovante et durable. Abondante, peu coûteuse et à faible impact environnemental, elle peut agir comme additif pouzzolanique lorsqu'elle est activée thermiquement, offrant ainsi un bon compromis entre performance et durabilité environnementale [4].

III-7. Problèmes liés à la production de ciment (émissions de CO₂, consommation énergétique) :

La production de ciment, en particulier celle du clinker, constitue un processus à forte intensité énergétique et fortement émetteur de gaz à effet de serre. Deux principales sources d'émissions de CO₂ sont identifiées [4] :

III-7-1. Les réactions chimiques (décarbonatation) :

Lors de la cuisson du calcaire (CaCO₃) dans le four à ciment, une réaction chimique appelée décarbonatation libère une quantité importante de CO₂:



Cette étape représente à elle seule près de 60 % des émissions totales de CO₂ liées à la fabrication du ciment [4].

III-7-2. La combustion de combustibles fossiles : Pour atteindre les températures nécessaires à la formation du clinker (environ 1450 °C), les fours consomment de grandes quantités d'énergie, souvent issues de sources fossiles comme le charbon ou le pétrole. Cette combustion contribue à environ 30 à 40 % des émissions restantes

Outre les émissions de gaz à effet de serre, le procédé est également très énergivore. On estime que la fabrication d'une tonne de ciment nécessite environ 3,2 à 6 GJ d'énergie thermique, sans compter l'énergie électrique utilisée pour le broyage, le transport et le conditionnement.

Ces impacts environnementaux posent de grands défis dans un contexte mondial de transition écologique et de lutte contre le réchauffement climatique. L'industrie est donc confrontée à la nécessité de réduire son empreinte carbone tout en maintenant une production suffisante pour répondre à la demande croissante en infrastructures, notamment dans les pays en développement.

La recherche de solutions alternatives, comme la substitution partielle du clinker par des matériaux à faible impact environnemental, devient ainsi une priorité stratégique pour un ciment plus durable [4].

III-8. Intérêt des ajouts minéraux :

III-8-1. Rôle des matériaux pouzzolaniques :

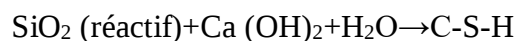
Face aux défis environnementaux posés par la production de ciment, l'incorporation de matériaux cimentaires secondaires (MCS), aussi appelés ajouts minéraux, est devenue une pratique courante pour améliorer la durabilité des liants tout en réduisant leur empreinte carbone. Ces ajouts permettent notamment de remplacer partiellement le clinker, principal responsable des émissions de CO₂ [4].

Parmi les MCS, on distingue principalement :

- **Les ajouts d'origine industrielle :** Cendres volantes (provenant des centrales thermiques), laitiers de haut-fourneau, fumées de silice.
- **Les ajouts d'origine naturelle :** Comme les pouzzolanes naturelles ou les argiles calcinées.

Ces matériaux possèdent des propriétés pouzzolaniques, c'est-à-dire qu'ils sont capables de réagir avec la chaux libre Ca (OH)₂ libérée lors de l'hydratation du ciment Portland, pour former des produits cimentaires secondaires, principalement des silicates de calcium hydratés (C-S-H), qui contribuent à la résistance mécanique et à la durabilité du béton [4].

La réaction pouzzolanique peut être schématisée ainsi :



Cette équation représente la réaction entre la silice amorphe (présente dans les matériaux pouzzolaniques comme l'argile calcinée), la chaux (hydroxyde de calcium) et l'eau pour former du C-S-H (Calcium Silicate Hydrate), qui est le principal produit responsable de la résistance mécanique dans les ciments hydrauliques [4].

Les avantages de l'utilisation de matériaux pouzzolaniques sont multiples :

- Réduction de la teneur en clinker, donc des émissions de CO₂
- Amélioration de la durabilité (résistance aux attaques chimiques, perméabilité réduite)
- Optimisation des propriétés mécaniques à long terme
- Valorisation de ressources locales ou de sous-produits industriels

Dans ce contexte, les argiles calcinées, lorsqu'elles sont correctement transformées thermiquement,

présentent un fort potentiel comme matériau pouzzolanique, particulièrement dans les régions où les autres ajouts industriels sont peu disponibles [4].

III-9. Objectif de l'étude :

Dans le cadre de la transition vers des matériaux de construction plus durables, cette étude vise à explorer le potentiel de l'argile calcinée en tant qu'additif cimentaire. L'objectif principal est d'évaluer l'influence de l'argile calcinée sur les propriétés physico-chimiques du ciment, afin de déterminer sa capacité à améliorer les performances du liant tout en réduisant son impact environnemental [4]

Plus précisément, cette étude se propose de :

- Analyser les effets de l'incorporation d'argile calcinée (à différents taux de substitution) sur les propriétés physiques du ciment, telles que la finesse, la consistance normale, le temps de prise, et la résistance mécanique.
- Étudier les modifications chimiques et minéralogiques induites par l'ajout d'argile calcinée, en particulier les réactions pouzzolaniques et la formation de produits d'hydratation secondaires.
- Comparer les performances du ciment modifié avec celles d'un ciment de référence (sans additif) sur le plan mécanique et chimique.
- Évaluer l'intérêt environnemental de cette substitution dans une logique de réduction des émissions de CO₂ et de consommation de clinker.

À travers cette approche, l'étude contribue à la valorisation de matériaux naturels locaux et à la recherche de solutions alternatives pour une production de ciment plus durable et plus respectueuse de l'environnement [4].

III-10. Matières premières :

III-10-1. Description de l'argile utilisée (composition, origine) :

L'argile utilisée dans cette étude est une argile naturelle kaolinitique, extraite localement dans la région de [à compléter selon ta localisation ou ton étude]. Ce type d'argile est reconnu pour sa teneur relativement élevée en minéraux argileux réactifs, notamment la kaolinite ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$), qui constitue la phase principale active après calcination.

Avant son traitement thermique, l'argile a été caractérisée chimiquement à l'aide d'une analyse par fluorescence X (XRF), révélant une composition typique en [4] :

- Silice (SiO_2) : ~50–55 %
- Alumine (Al_2O_3) : ~20–25 %
- Oxyde de fer (Fe_2O_3) : ~5–8 %
- Traces de MgO , CaO , K_2O et Na_2O

La présence importante de silice et d'alumine est favorable au développement d'une activité pouzzolanique après calcination. L'argile a également été analysée par diffraction des rayons X (DRX), confirmant la prédominance de la kaolinite, ainsi que la présence de quartz et d'illite en moindre proportion [4].

L'échantillon a ensuite été soumis à un traitement thermique entre 650 °C et 800 °C, température optimale pour déshydrater la kaolinite et la transformer en métakaolinite, une forme amorphe hautement réactive sur le plan pouzzolanique.

Ce type d'argile présente donc un intérêt particulier pour la production de ciments ternaires ou composés, notamment dans les zones où les ressources alternatives (comme les cendres volantes ou les laitiers) sont peu disponibles [4].

III-10-2. Procédé de calcination :

La calcination de l'argile constitue une étape essentielle pour activer son potentiel pouzzolanique. Ce procédé consiste à chauffer l'argile à haute température afin de provoquer des transformations physico-chimiques, principalement la dés hydroxylation des minéraux argileux comme la kaolinite, qui se transforme alors en métakaolinite amorphe, une phase hautement réactive.

Dans cette étude, l'argile brute a d'abord été séchée à l'air libre pendant plusieurs jours, puis concassée et tamisée pour obtenir une granulométrie inférieure à 2 mm, facilitant une calcination homogène [4].

Le traitement thermique a été réalisé dans un four électrique de laboratoire, selon les paramètres suivants :

- Température de calcination : 750 °C (température optimale pour la kaolinite)
- Durée de maintien à température : 2 heures
- Vitesse de montée en température : environ 10 °C/min
- Refroidissement : à l'air ambiant, hors du four

Après calcination, l'argile a pris une teinte rougeâtre à rosée, caractéristique de la transformation

minéralogique, et a été broyée finement jusqu'à atteindre une finesse comparable à celle du ciment Portland (surface spécifique d'environ 300 à 400 m²/kg mesurée par la méthode Blaine).

Le matériau obtenu, appelé argile calcinée, a ensuite été utilisé comme substitut partiel du clinker, à différents taux (5 %, 10 %, 15 %, etc.), afin d'évaluer ses effets sur les propriétés du ciment [4].

III-10-3. Type de ciment de base

Le ciment utilisé comme liant de référence dans cette étude est un ciment Portland pur de type CEM I 52.5, conforme à la norme EN 197-1. Ce type de ciment est composé à plus de 95 % de clinker, ce qui en fait un bon support pour évaluer l'impact des matériaux de substitution tels que l'argile calcinée [4].

III-10-4. Caractéristiques principales du CEM I 52.5 :

- Résistance mécanique élevée à 28 jours (> 52,5 MPa)
- Prise rapide et bon développement des résistances initiales
- Composition chimique typique :
 - ❖ Clinker : > 95 %
 - ❖ Sulfate de calcium (gypse) : ~5 %
 - ❖ Perte au feu : faible
- Finesse Blaine : entre 320 et 400 m²/kg

Ce ciment est largement utilisé dans les applications structurelles où des résistances mécaniques élevées sont requises rapidement. Dans cette étude, il sert de base de comparaison pour évaluer l'effet de la substitution partielle du clinker par l'argile calcinée, en conservant la même procédure de formulation et de mise en œuvre.

Le CEM I 52.5 permet ainsi de bien isoler l'influence de l'argile calcinée sur les performances finales du ciment [6]

Chapitre IV : Résultats et discussion

IV- Résultats et discussion

IV-1-Introduction

Les résultats expérimentaux obtenus au cours de cette étude concernent des analyses chimique et physico-mécanique de (13) échantillons des mélanges réalisés dans laboratoire de la cimenterie CILAS, apparaissent l'impact de l'argile calcinée sur les propriétés physique et chimique de la qualité du ciment.

IV-2-Mode opératoire

- L'échantillon d'argile doit être réduit pour obtenir un échantillon contenant au moins 1000 g
- Un concasseur et un sur-broyeur appropriés doivent être utilisés de façon à obtenir la finesse requise : $< 200 \mu\text{m}$
- 30g de L'échantillon doit être calciné à différentes températures ($T= 650 \text{ C}^\circ$, $T=750 \text{ C}^\circ$) pendant 1 et 3 heures
- Faire une Analyse XRF et XRD à chaque étape de préparation
- Faire les analyses physico mécaniques (OPC avec 5 %, 25% et 30 % argile calcinée) pour chaque échantillon

IV-3-Analyses physiques (granulométrie) :

A - avant broyage : Le poids total de l'échantillon égale : **24,561 kg**

Tableau IV.1 : Pourcentage granulométries avant broyage

Diamètre de tamis (mm)	< 25 mm	> 8 < 10 mm	> 5 < 8 mm	> 3 < 5 mm	<3 mm
Poids (kg)	0	6,565	4,062	6,911	7,023
%	0	26,73	16,54	28,14	25,59

B-Après broyage : Le poids total de l'échantillon égale : **5 kg**

Tableau IV.2 : Pourcentage granulométries après broyage

Diamètre de tamis (µm)	< 1000 µm	>200 < 1000 µm	> 90 < 200 µm	> 90 µm
Poids (g)	0	475	3425	1100
%	0	9,5	68,5	22

IV-4-Analyse chimiques :**IV-4-1-Avant calcination :****A-Analyse par fluorescence X (XRF)**

L'analyse XRF a été utilisée pour déterminer la composition chimique élémentaire de l'argile.

Les principaux oxydes détectés sont :

Tableau IV.3 : Analyse par fluorescence X (XRF) avant calcination

Éch	PAF(950 C°)	H₂O	SiO₂	Al₂O₃	Fe₂O₃	CaO	MgO	P₂O₅	SO₃	K₂O	Na₂O	Cl
Argile	12,98	5 ,46	53,79	17,44	6,13	7,71	3,16	0,24	0,82	2,12	0,94	0,25

Ce profil chimique riche en silice et alumine est caractéristique des matériaux pouzzolaniques, favorables aux réactions avec la chaux libre libérée lors de l'hydratation du ciment.

B- Analyse par diffraction des rayons X (DRX)

La DRX a été réalisée pour identifier les phases cristallines présentes avant calcination.

Les principaux résultats montrent :

- Avant calcination : kaolinite, quartz, traces d'illite

Tableau IV.4 : Analyse par diffraction des rayons X (DRX) avant calcination

Échantillon	Illite	Kaolinite	Quartz	Albite	Microcline	Feldspar	Calcite	Dolomite
Argile	37,21	18,83	17,54	4,88	2,42	7,31	10,82	1,52

La disparition de la kaolinite confirme la réussite de la transformation thermique et la formation d'un matériau amorphe réactif.

IV-4-2-Apres la calcination**A-Analyse par fluorescence X (XRF)**

L'analyse XRF a été utilisée pour déterminer la composition chimique élémentaire de l'argile calcinée. Les principaux oxydes détectés sont :

Tableau IV.5 : Analyse par fluorescence X (XRF) après calcination

				Analyse chimique											
Equipment	Granulométrie	Etats		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	P ₂ O ₅	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂	Cl	PAF
XRF	Supérieur 200 µm	Avant calcination		54.63	17.92	6.29	7.42	3.18	0.25	0.59	2.16	0.94	0.77	0.25	13.32
		Après calcination	750 C° (1H00)	49.40	16.38	6.19	7.14	3.02	0.23	0.55	2.13	0.91	0.77		11.85
			750 C° (3H00)	49.36	16.24	6.19	7.11	3.02	0.23	0.54	2.12	0.92	0.77		12.38
			650 C° (1H00)	49.79	16.41	6.26	7.19	3.05	0.24	0.53	2.15	0.29	0.78		9.82
			650 C° (3H00)	48.63	16.00	6.05	7.03	2.96	0.23	0.55	2.10	0.90	0.76		12.08
			900 C° (1H00)	49.18	16.23	6.13	7.06	3.02	0.23	0.53	2.10	0.92	0.77		12.97
			900 C° (3H00)	49.12	16.19	6.16	7.09	3.01	0.24	0.50	2.08	0.93	0.77		13.01
	Entre 200 et 90 µm	Avant calcination		53.94	17.52	6.12	7.82	3.17	0.25	0.81	2.12	0.94	0.75	0.24	13.67
		Après calcination	750 C° (1H00)	48.55	15.79	6.02	7.48	3.00	0.23	0.82	2.08	0.89	0.75		13.27
			750 C° (3H00)	48.74	15.89	6.05	7.49	3.00	0.23	0.82	2.09	0.90	0.76		12.73
			650 C° (1H00)	48.86	15.86	6.09	7.57	2.98	0.23	0.85	2.10	0.89	0.76		10.05
			650 C° (3H00)	47.99	15.56	5.94	7.44	2.94	0.23	0.86	2.06	0.88	0.74		12.25
			900 C° (1H00)	48.58	15.80	6.01	7.58	3.00	0.23	0.86	2.06	0.91	0.75		13.38
	900 C° (3H00)		48.52	15.82	6.04	7.48	2.97	0.23	0.82	2.05	0.90	0.75		13.51	
	Inférieur	Avant calcination		52.90	16.88	5.90	8.12	3.13	0.24	0.93	2.06	0.93	0.73	0.24	14.48

		Après calcination	750 C° (1H00)	54.87	17.29	6.46	8.78	3.40	0.25	1.05	2.24	0.99	0.79		13.77
			750 C° (3H00)	48.26	15.13	5.83	7.99	2.95	0.22	0.96	2.02	0.88	0.73		13.97
			650 C° (1H00)	48.78	15.28	5.89	7.98	2.97	0.22	0.94	2.05	0.87	0.74		10.44
			650 C° (3H00)	47.88	15.06	5.81	7.83	2.91	0.22	0.93	2.01	0.86	0.73		12.20
			900 C° (1H00)	48.42	15.24	5.82	7.89	2.96	0.22	0.94	2.02	0.88	0.73		13.96
			900 C° (3H00)	48.50	15.21	5.85	7.89	2.95	0.22	0.92	2.01	0.88	0.73		14.09

B- Analyse par diffraction des rayons X (DRX)

La DRX a été réalisée pour identifier les phases cristallines présentes après calcination.

Les principaux résultats montrent :

- -Après calcination : disparition des pics de kaolinite, formation d'une phase amorphe (métakaolinite), conservant du quartz inchangé

La disparition de la kaolinite confirme la réussite de la transformation thermique et la formation d'un matériau amorphe réactif.

Tableau IV.6 : Analyse par diffraction des rayons X (DRX) après calcination

			Analyse ménalorgique									
Equipement	Granulométrie	Etats	Illite	Kaolinite	Quartz	Albite	Microcline	Feldspar	Calcite	Dolomite		
	Supérieur 200 µm	Avant calcination		38,63	19,05	16,57	4,73	2,23	7,31	10,82	1,52	
		Après calcination	750 C° (1H00)		40,61	9,21	26,26	4,44	8,99	13,43	1,76	0.00
			750 C° (3H00)		35,26	8,52	30,01	5,48	11,52	17,01	0,01	0.00
			650 C° (1H00)		43,97	8,76	25,73	3,62	7,1	10,71	2,3	0.00
			650 C° (3H00)		44,67	8,52	26,7	3,92	7,27	11,19	0.00	0.00
			900 C° (1H00)		9,8	7,49	25,27	15,54	11,77	27,31	0,71	2,32
			900 C° (3H00)		11,51	7,08	23,99	16,72	11,29	28.00	0,68	2,66
	Entre 200 et 90 µm	Avant calcination		36,26	17,99	17,14	4,18	2,96	7,13	11,03	1,72	
		Après calcination	750 C° (1H00)		39,59	9,73	28,58	4.00	9,4	13,39	0,64	0.00
			750 C° (3H00)		34,38	11,91	32,11	5,32	8,18	13,5	0,41	0.00
			650 C° (1H00)		40,25	9,42	23,79	4,91	7,65	12,56	6,14	0.00
			650 C° (3H00)		43,71	12,48	27.00	5,1	6,39	11,48	0,13	0.00
			900 C° (1H00)		13,97	5,94	35,09	9,75	13,71	23,47	0,64	1,2
			900 C° (3H00)		9,64	4,97	20,76	19,49	12,49	31,98	0,51	0.00
	Inférieur 90 µm	Avant calcination		35,91	16,12	18,34	4,89	3,27	8,16	11,32	2,83	
		Après calcination	750 C° (1H00)		34,68	10,84	30,07	6,11	9,78	15,89	1,3	0.00
			750 C° (3H00)		33,53	7,76	33,51	6,54	9,69	16,23	0,28	0.00

			650 C° (1H00)	38,38	10,00	25,1	4,27	7,9	12,17	7,46	0.00
			650 C° (3H00)	42,41	8,35	29,56	6,69	5,97	12,66	0,2	0.00
			900 C° (1H00)	13,36	6,39	34,96	12,92	13,69	26,61	0,65	1,44
			900 C° (3H00)	11,53	5,51	26,13	16,04	13,42	29,46	0,46	2,72

IV-5-Choisir les échantillons d'argile calciné

Les échantillons sélectionner basé sur la variation de % kaolinite, calcite et illite

Tableau IV.7 : Choix les échantillons d'argile calciné

			Analyse ménalorgique							
			Illite	Kaolinite	Quartz	Albite	Microcline	Feldspar	Calcite	Dolomite
Inférieur 90 µm	Après calcination	750 C° (1H00)	34,68	10,84	30,07	6,11	9,78	15,89	1,3	0.00
		750 C° (3H00)	33,53	7,76	33,51	6,54	9,69	16,23	0,28	0.00
		650 C° (1H00)	38,38	10.00	25,1	4,27	7,9	12,17	7,46	0.00
		650 C° (3H00)	42,41	8,35	29,56	6,69	5,97	12,66	0,2	0.00

IV-6-Préparation des mélanges (avec argile calcinée)

Afin d'évaluer l'impact de l'argile calcinée sur les propriétés physico-chimiques du ciment, plusieurs formulations ont été préparées en remplaçant partiellement le clinker du ciment Portland (CEM I 52.5) par l'argile calcinée. Cette substitution a été réalisée en pourcentage massique, selon les proportions suivantes :

- **Ech 01, Ech 02, Ech 03, Ech 04:** 95 % CEM I + 5 % argile calcinée
- **Ech 05, Ech 06, Ech 07, Ech 08:** 75 % CEM I + 25 % argile calcinée
- **Ech 09, Ech 10, Ech 11, Ech 12:** 70 % CEM I + 30 % argile calcinée
- **Ech 13 (référence) :** 100 % CEM I (sans ajout)
- ❖ Chaque mélange a été soigneusement homogénéisé à sec dans un mélangeur de laboratoire afin de garantir une distribution uniforme de l'argile calcinée dans la matrice cimentaire.
- ❖ Pour chaque formulation, des pâtes et mortiers ont été préparés selon les prescriptions de la norme **EN 196-1**, en respectant :
 - Une composition de mortier standardisée avec un rapport sable/ciment de 3 :1,
 - Un mélange mécanique pour assurer la reproductibilité des essais.

Ces mélanges ont ensuite été utilisés pour réaliser des essais de caractérisation physico-chimique et

mécanique, dans le but de comparer l'évolution des performances en fonction du taux de substitution.

IV-6-1-Analyse de mélange

A-Analyse par fluorescence X (XRF)

L'analyse XRF a été utilisée pour déterminer la composition chimique élémentaire de mélange.

Les principaux oxydes détectés sont :

Tableau IV.8 : Analyse par fluorescence X (XRF) de mélange

Equipement	Granulométrie	Mélange	Percentage argile C	Température	Temps de	N° Ech	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	Cl	PAF(950°C)	PAF(550c°)
XRF	Inférieur 90 µm	OPC + Argile Calcinée	5	650	1	1	23.45	6.41	3.46	65.40	2.05	2.87	0.70	0.25	0.070	2.82	1.85
				650	3	2	23.63	6.62	3.46	65.42	2.07	2.83	0.70	0.26	0.075	2.45	1.71
				750	1	3	23.71	6.61	3.47	65.58	2.10	2.87	0.70	0.26	0.080	2.63	1.89
				750	3	4	23.49	6.49	3.45	65.46	2.09	2.88	0.70	0.26	0.077	2.63	1.93
			25	650	1	5	31.54	10.80	4.85	66.32	2.56	2.24	0.89	0.42	0.096	3.7	1.56
				650	3	6	31.47	10.74	4.89	66.31	2.59	2.25	0.86	0.42	0.108	3.34	1.86
				750	1	7	30.66	10.25	4.81	66.28	2.58	2.31	0.87	0.40	0.096	2.53	1.57
				750	3	8	29.57	9.64	4.69	66.13	2.50	2.34	0.85	0.37	0.090	2.36	1.46
			30	650	1	9	33.52	11.90	5.27	66.15	2.68	2.07	0.92	0.46	0.093	3.80	1.52
				650	3	10	33.40	11.78	5.33	66.15	2.71	2.11	0.90	0.46	0.098	3.40	1.88
				750	1	11	32.51	11.24	5.25	66.11	2.71	2.18	0.92	0.43	0.091	2.60	1.62
				750	3	12	31.89	10.90	5.24	65.88	2.66	2.21	0.92	0.42	0.095	2.27	1.44
			100% OPC	/	/	13	21.48	5.44	3.15	64.80	1.91	3.09	0.65	0.21	0.073	2.35	1.61

B- Analyse par diffraction des rayons X (DRX)

La DRX a été réalisée pour identifier les phases cristallines présentes après le mélange.

Les principaux résultats montrent :

Tableau IV.9 : Analyse par diffraction des rayons X (DRX) de mélange

Equipement	Granulométrie	Mélange	Percentage argile C (%)	Température (C°)	Tems de calcination (H)	N° Ech	Alum_Sum	Belite_Sum	Alite_Sum	Ferri te	Gypseu m	Calci te	Portlond ite	Hemi_Hyd ra	Quar tz	Dolomi te	SO ₃ _X RD	FCaO_X RD	CO ₂ _X RD
DRX	Inférieur 90 µm	OPC + Argile Calcinée	5	650	1	1	4.93	10.72	64.3	11.16	3.09	1.23	1.33	0	1.01	0	2.16	1.28	0.54
				650	3	2	5.01	11.28	64.15	11.03	2.67	1.02	1.29	0.02	1.18	0	2.05	1.17	0.45
				750	1	3	5.12	11.53	65.06	10.86	2.66	0	1.26	0.1	1.04	0	2.05	1.24	0
				750	3	4	5.07	11.6	65.29	11.17	2.6	0	1.16	0.08	0.9	0	2.01	0.96	0
			25	650	1	5	4.57	9.23	57.51	9.44	2.34	3.15	1.29	0	7.43	0	3.39	1.13	1.39

				650	3	6	4.67	8.96	57.53	9.78	2.49	2.57	1.26	0	7.54	0	3.58	0.99	1.13
				750	1	7	5.28	11.5	57.7	9.69	2.05	0	1.3	0	6.92	0	3.48	1.2	0
				750	3	8	4.88	9.5	59.11	10.71	2.32	1.69	0.89	0	6.15	0	3.29	0.79	0.74
			30	650	1	9	4.13	8.61	54.45	9.79	2.22	3.62	1.48	0	9.53	0	3.98	1.3	1.59
				650	3	10	4.16	8.36	56.21	9.76	2.18	2.63	0.96	0	9.86	0	3.86	0.92	1.16
				750	1	11	5.19	10.1	56.54	9.59	2.22	0	0.94	0	9.28	0	3.89	0.94	0
				750	3	12	5.27	10.72	56.13	9.95	2.25	0	0.92	0	8.76	0	3.92	0.75	0
			100% OPC	/	/	13	4.89	11.5	64.34	11.11	2.87	1.32	1.82	0.04	0.05	0	1.95	1.71	0.58

IV-7-Caractérisations physiques

IV-7-1- Finesse et surface spécifique

Les propriétés physiques des différents mélanges cimentaires ont été évaluées afin de mesurer l'effet de l'ajout d'argile calcinée sur les caractéristiques du liant.

Les paramètres clés ont été analysés : la finesse, la surface spécifique.

La finesse de mouture est un facteur important qui influence la réactivité du ciment et la vitesse de développement des résistances mécaniques. Elle a été déterminée à l'aide de la méthode de la perméabilité de Blaine, selon la norme **EN 196-6**.

Les résultats montrent que l'introduction d'argile calcinée, plus fine que le clinker, entraîne généralement une augmentation de la surface spécifique du liant.

Tableau IV.10 : Finesse et surface spécifique de mélange

Equipement	Granulométrie	Mélange	Pourcentage argile C (%)	Température (C°)	Temps de calcination (H)	N° Echantillon	SSB	45μ	90 μ
Blaine	Inférieur 90 μm	OPC + Argile Calcinée	5	650	1	1	4601	1.94	0.16
				650	3	2	4615	2.06	0.2
				750	1	3	4519	2.26	0.19
				750	3	4	4477	2.27	0.07
			25	650	1	5	5938	5.59	0.16
				650	3	6	5650	5.40	0.09
				750	1	7	5146	6.33	0.12
				750	3	8	4927	6.36	0.08
			30	650	1	9	6046	7.00	0.1
				650	3	10	5953	6.29	0.08
				750	1	11	5391	7.45	0.11
				750	3	12	5073	7.19	0.09
			100% OPC	/	/	13	3714	1.72	0.32

Cette augmentation de finesse peut contribuer à une meilleure réactivité initiale, mais peut aussi affecter la demande en eau.

IV-8-Essais mécaniques (résistance à la compression à 2, 7 et 28 jours)

L'évaluation des performances mécaniques des mélanges cimentaires a été réalisée à travers des essais de résistance à la compression, conformément à la norme **EN 196-1**. Ces essais ont pour objectif de mesurer la capacité portante des mortiers élaborés à base de ciment modifié par l'argile calcinée, aux âges de 2, 7 et 28 jours.

IV-8-1-Dispositif expérimental :

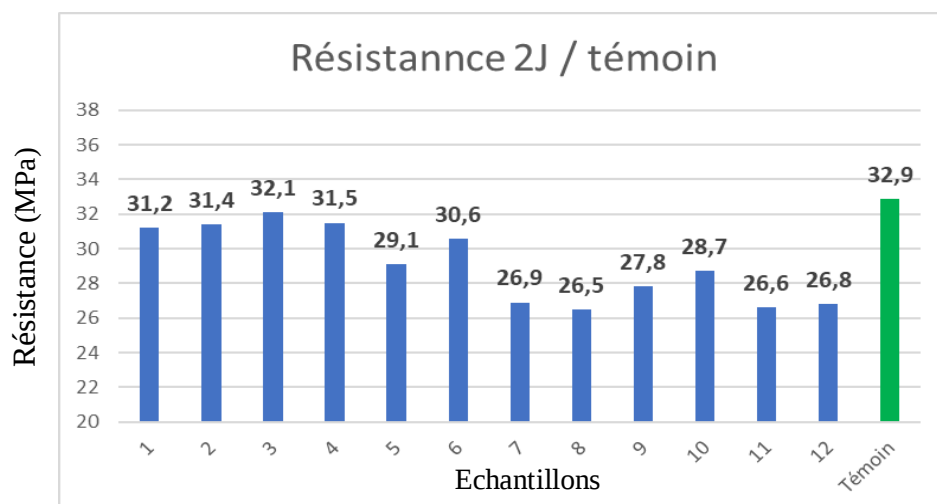
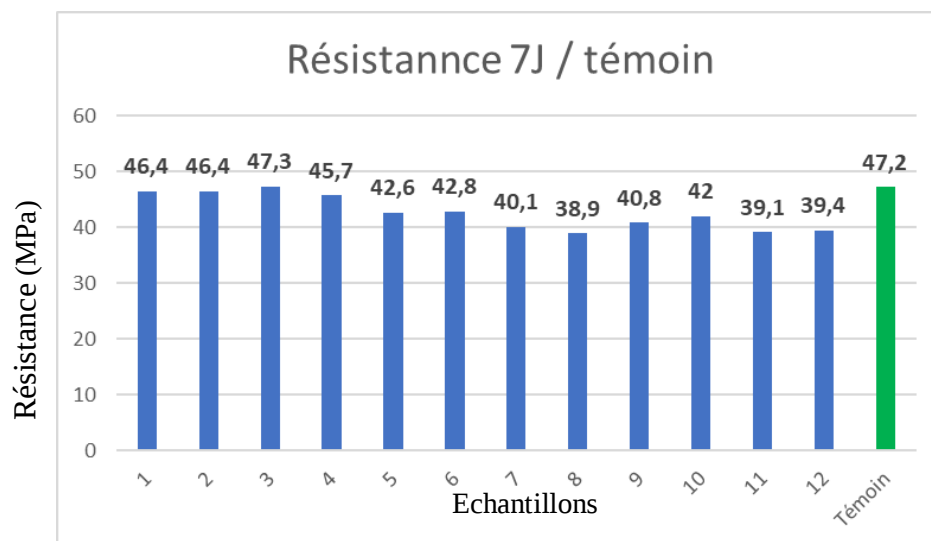
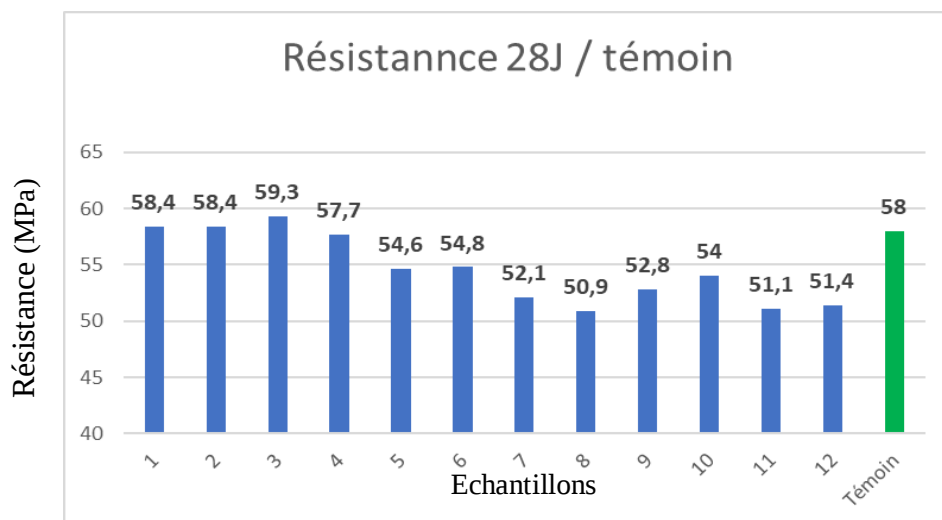
- Éprouvettes prismes standards : **40 × 40 × 160 mm**
- Rapport eau/ciment constant pour tous les mélanges
- Conditions de conservation : **20 ± 2 °C**, humidité relative ≥ 95 %
- Essais réalisés avec une presse hydraulique à un taux de chargement contrôlé

IV-8-2_Résultats des résistances à la compression (MPa) :

Le tableau IV.11 et les figures ci-dessous est représenté les résultats des résistances à la compression des échantillons sans et avec argile calcinée :

Tableau IV.11 : Résultats des résistances à la compression

Granulométrie	Mélange	Percentage argile C (%)	Température (C°)	Tems de calcination (H)	N° Echantillon	F2J	F7J	F28J	C2J	C7J	C28J
Inférieur 90 µm	OPC + Argile Calcinée	5	650	1	1	5.3	6.2	8	31.2	46.4	58.4
			650	3	2	5.5	7	8	31.4	46.4	58.4
			750	1	3	5.3	7.1	8.3	32.1	47.3	59.3
			750	3	4	5.5	6.8	8.1	31.5	45.7	57.7
		25	650	1	5	5.4	6.7	8.2	29.1	42.6	54.6
			650	3	6	5.1	6.4	7.9	30.6	42.8	54.8
			750	1	7	4.9	5.9	7.9	26.9	40.1	52.1
			750	3	8	5.3	6.4	7.8	26.5	38.9	50.9
		30	650	1	9	5.3	6	8	27.8	40.8	52.8
			650	3	10	5.1	6.9	7.8	28.7	42	54
			750	1	11	4.8	6	7.8	26.6	39.1	51.1
			750	3	12	4.7	6	7.9	26.8	39.4	51.4
		100% OPC	/	/	Témoin	5.1	6.8	8	32.9	47.2	58

**Figure IV.1 : Résistance 2J /témoin****Figure IV.2 : Résistance 7J / témoin****Figure IV.3 : Résistance 28J /témoin**

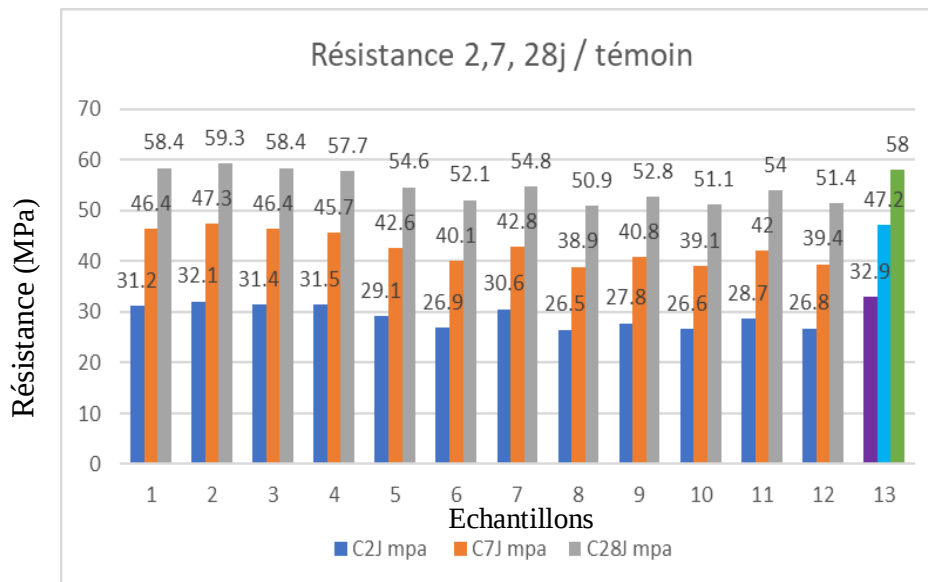


Figure IV.4 : Résistance 2,7,28J /témoin

IV-8-3-Interprétation des résultats :

- À **2 jours**, on observe une légère baisse des résistances initiales avec l'augmentation du taux d'argile calcinée, en raison de la réduction du clinker actif disponible pour l'hydratation primaire.
- À **7 jours**, les performances commencent à se stabiliser, notamment pour les taux $\leq 10\%$, suggérant une bonne réactivité pouzzolanique naissante.
- À **28 jours**, les mélanges ont 5% dépassent même la référence, indiquant que l'argile calcinée contribue efficacement au développement des résistances mécaniques à long terme, grâce à la formation secondaire de C-S-H.

Les résultats confirment que jusqu'à 5 % de substitution, l'argile calcinée peut améliorer ou maintenir les performances mécaniques du ciment, tout en permettant une réduction de clinker.

IV-8-4-Effets observés selon le taux d'argile calcinée

Tableau IV.12 : Effets observés selon le taux d'argile calcinée

Percentage argile C (%)	Température (C°)	Tems de calcination (H)	N° Echantillon	F2J	F7J	F28J	C2J	C7J	C28J	C28J
5	650	1	1	5.3	6.2	8	31.2	46.4	58.4	58.4
	650	3	2	5.5	7	8	31.4	46.4	58.4	58.4
	750	1	3	5.3	7.1	8.3	32.1	47.3	59.3	59.3
	750	3	4	5.5	6.8	8.1	31.5	45.7	57.7	57.7
25	650	1	5	5.4	6.7	8.2	29.1	42.6	54.6	54.6
	650	3	6	5.1	6.4	7.9	30.6	42.8	54.8	54.8
	750	1	7	4.9	5.9	7.9	26.9	40.1	52.1	52.1
	750	3	8	5.3	6.4	7.8	26.5	38.9	50.9	50.9
30	650	1	9	5.3	6	8	27.8	40.8	52.8	52.8
	650	3	10	5.1	6.9	7.8	28.7	42	54	54
	750	1	11	4.8	6	7.8	26.6	39.1	51.1	51.1
	750	3	12	4.7	6	7.9	26.8	39.4	51.4	51.4
100% OPC	/	/	Témoin	5.1	6.8	8	32.9	47.2	58	58

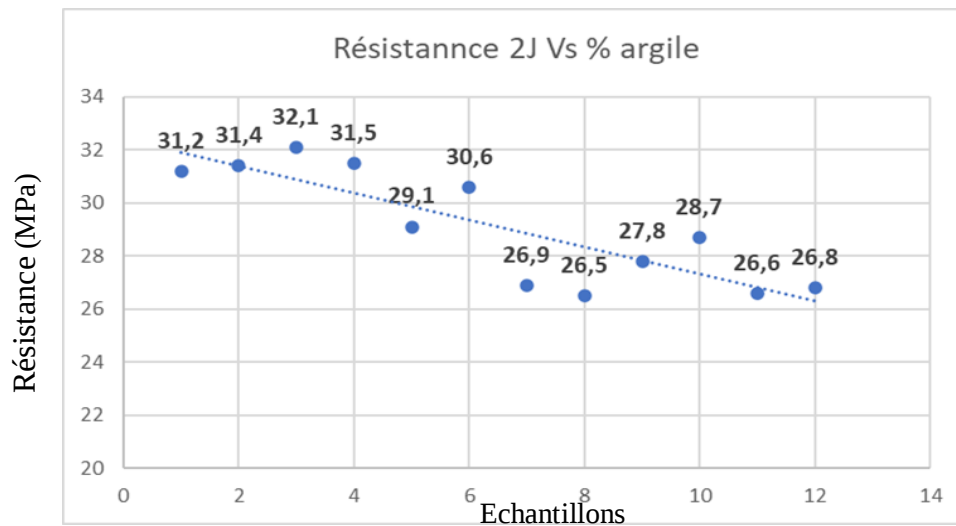


Figure IV.5 : Résistance 2J Vs% argile calcinée

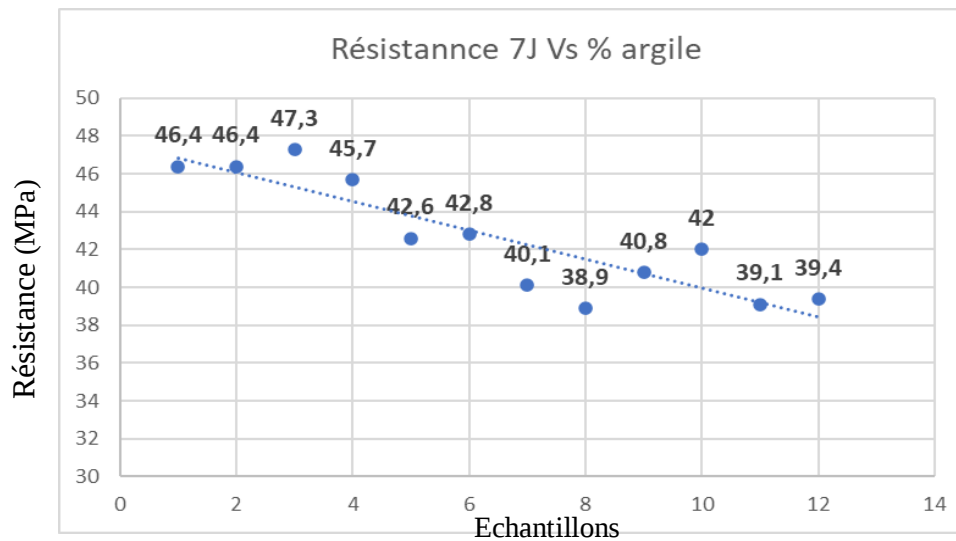


Figure IV.6 : Résistance 7J Vs% argile calcinée

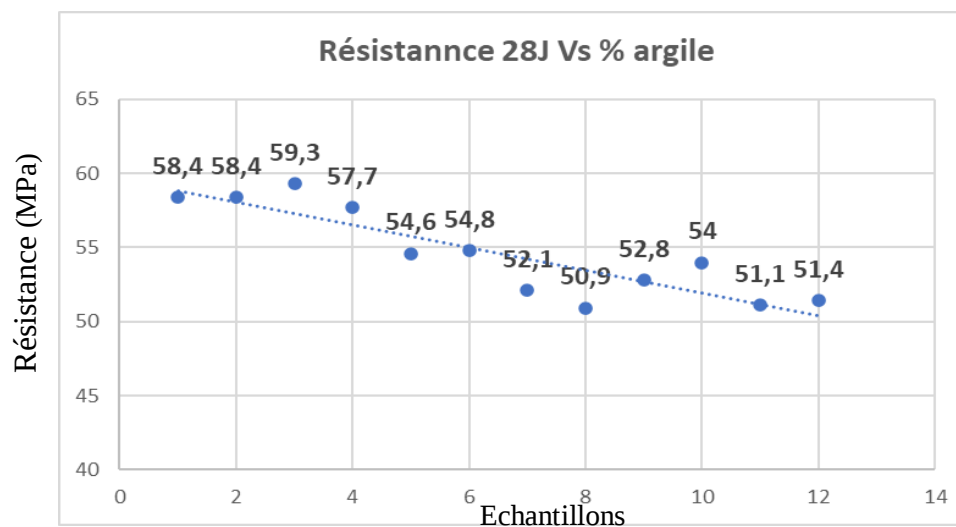


Figure IV.7 : Résistance 28J Vs% argile calcinée

L'optimisation du taux de substitution en argile calcinée repose sur un équilibre entre performances mécaniques, réactivité chimique, et durabilité, tout en tenant compte des contraintes économiques et environnementales.

Tableau IV.13 : L'optimisation du taux de substitution

Taux de substitution	Performances mécaniques	Réactivité chimique	Propriétés physiques	Commentaire synthétique
5 %	Supérieure à 28 jours	Très bonne	Acceptables	Taux optimal observé
25 %	Très proche de CEM I	Bonne	Peu modifiées	Substitution faible, sûr
30 %	En baisse	Réactivité plus lente	Trop d'eau requise	Risque de dilution excessif

IV-8-5-Critères d'optimisation retenus :

1. Maintien ou amélioration des résistances à 28 jours,
2. Réduction des émissions de CO₂ par baisse de clinker,
3. Réactivité pouzzolanique active,
4. Propriétés physiques gérables sans adjuvants excessifs.

IV-8-6-Taux recommandé :

Le taux de substitution optimal se situe autour de 5 % :

- Il offre une amélioration mécanique à long terme,
- Une réactivité chimique suffisante pour consommer la portlandite,

Des taux jusqu'à 30 % peuvent être envisagés selon les applications (ex : bétons peu sollicités ou non structurels), mais au-delà, une baisse de performance mécanique

IV-8-7- Effets observés selon La température d'argile calcinée**Tableau IV.14 :** Effets observés selon la température d'argile calcinée

Percentage argile C (%)	Température (C°)	Tems de calcination (H)	N° Echantillon	F2J	F7J	F28J	C2J	C7J	C28J	C28J
5	650	1	1	5.3	6.2	8	31.2	46.4	58.4	58.4
	650	3	2	5.5	7	8	31.4	46.4	58.4	58.4
	750	1	3	5.3	7.1	8.3	32.1	47.3	59.3	59.3
	750	3	4	5.5	6.8	8.1	31.5	45.7	57.7	57.7
25	650	1	5	5.4	6.7	8.2	29.1	42.6	54.6	54.6
	650	3	6	5.1	6.4	7.9	30.6	42.8	54.8	54.8
	750	1	7	4.9	5.9	7.9	26.9	40.1	52.1	52.1
	750	3	8	5.3	6.4	7.8	26.5	38.9	50.9	50.9
30	650	1	9	5.3	6	8	27.8	40.8	52.8	52.8
	650	3	10	5.1	6.9	7.8	28.7	42	54	54
	750	1	11	4.8	6	7.8	26.6	39.1	51.1	51.1
	750	3	12	4.7	6	7.9	26.8	39.4	51.4	51.4
100% OPC	/	/	Témoin	5.1	6.8	8	32.9	47.2	58	58

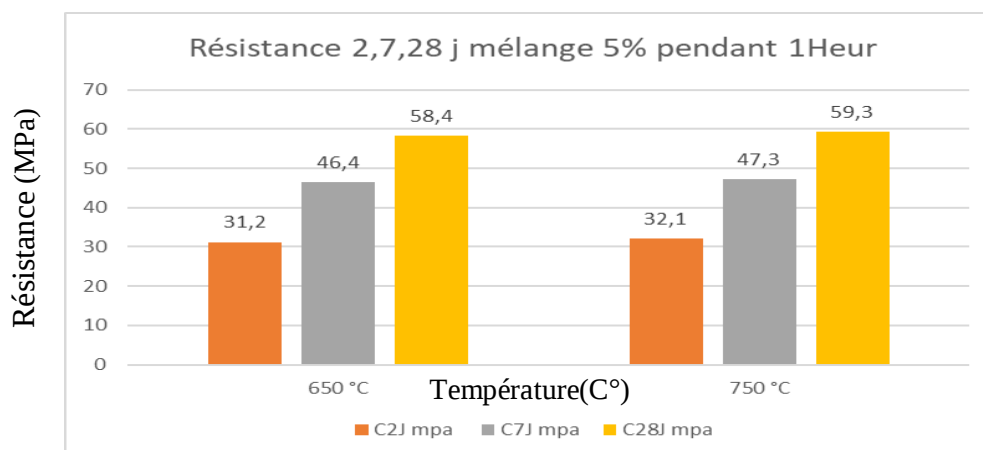


Figure IV.8 : Résistance 2,7,28 J mélange 5% pendant 1 Heur

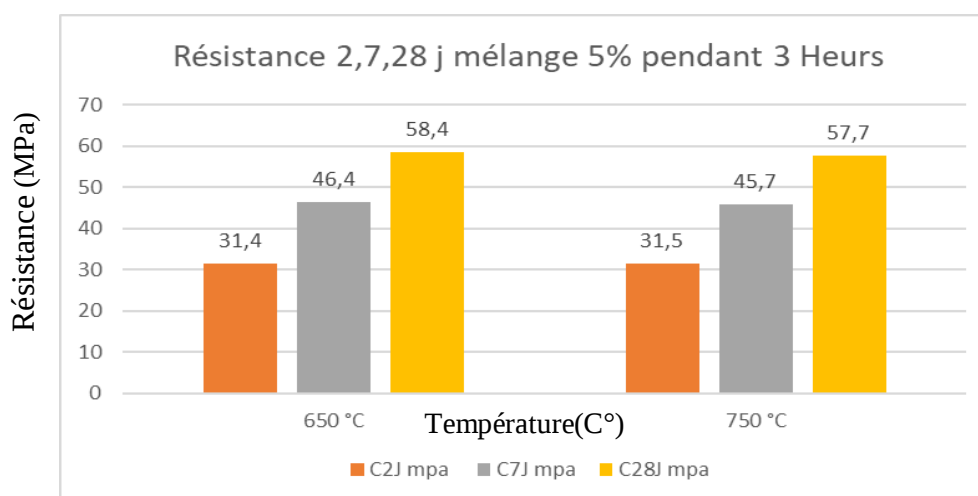


Figure IV.9 : Résistance 2,7,28 J mélange 5% pendant 3 Heurs

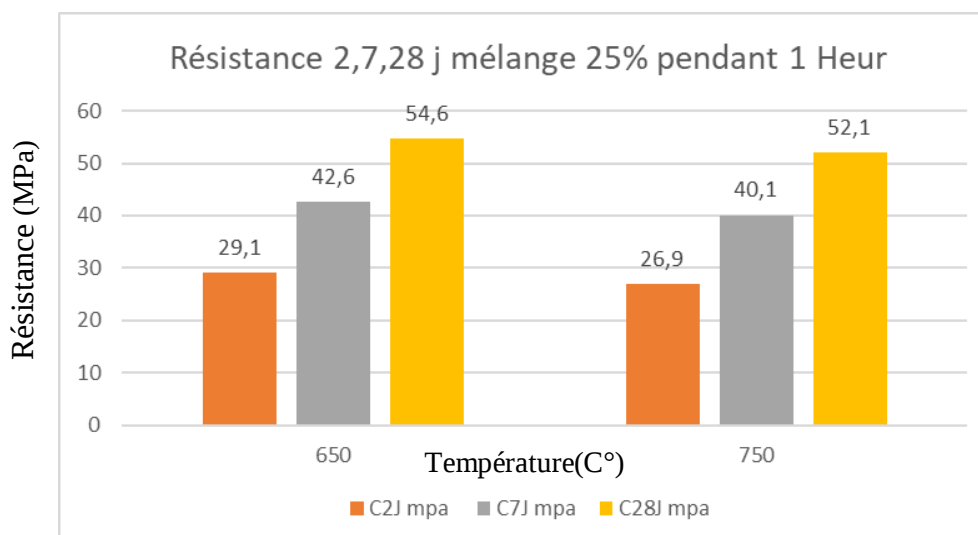


Figure IV.10 : Résistance 2,7,28 J mélange 25% pendant 1 Heur

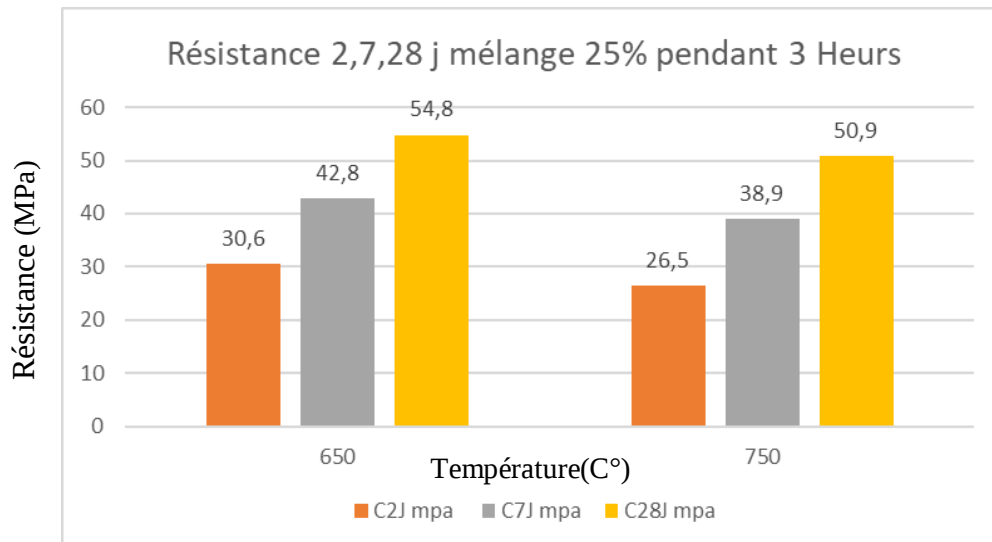


Figure IV.11 : Résistance 2,7,28 J mélange 25% pendant 3 Heurs

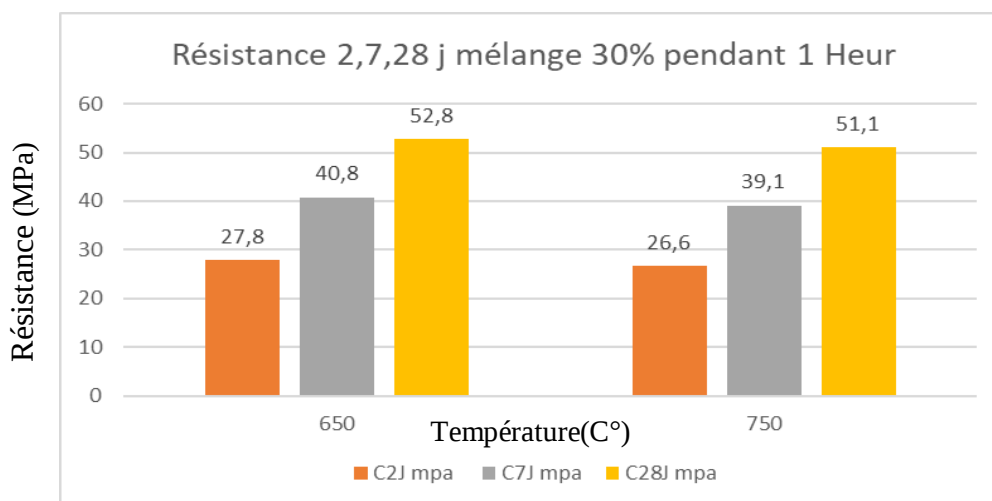


Figure IV.12 : Résistance 2,7,28 J mélange 30% pendant 1 Heur

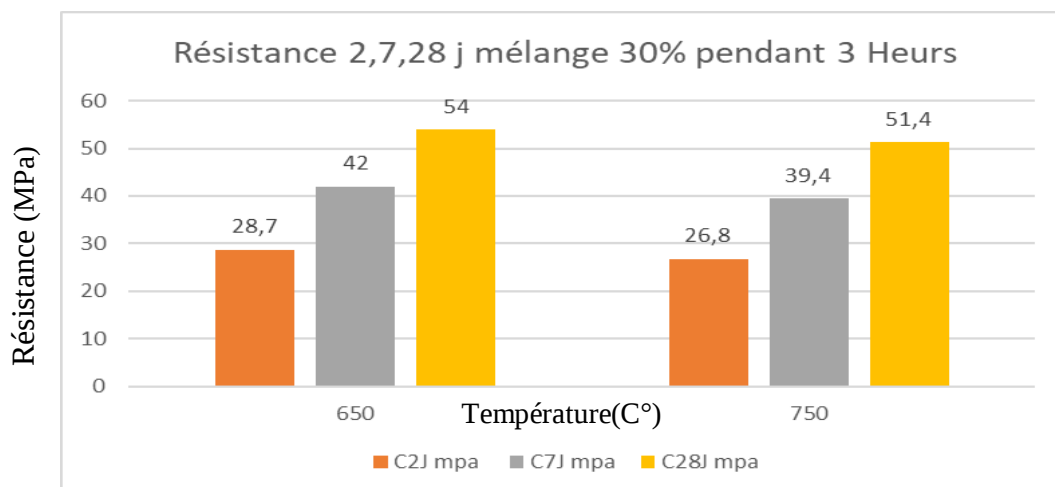


Figure IV.13 : Résistance 2,7,28 J mélange 30% pendant 3 Heurs

Pour analyser la corrélation entre la résistance et la température, on peut observer les colonnes de résistance (par exemple F28J, C28J, etc.) pour deux températures de calcination : 650°C et 750°C, tout en gardant le pourcentage constant (5%, 25%, 30%).

Voici un résumé rapide pour C28J (résistance à 28 jours) :

1. Pourcentage de remplacement : 5% → Légère augmentation avec 750°C.
2. Pourcentage de remplacement : 25% → Légère baisse avec 750°C
3. Pourcentage de remplacement : 30% → Baisse avec 750°C.

IV-8-8-Conclusion :

- À faible pourcentage (5%), augmenter la température augmente légèrement la résistance.
- À pourcentages plus élevés (25% et 30%), augmenter la température réduit la résistance.

Cela suggère une corrélation non linéaire : la température optimale dépend du taux de substitution. Une température trop élevée (750°C) peut altérer la réactivité de certains ajouts à forte proportion.

Conclusion générale

Conclusion générale

L'étude a permis de démontrer l'intérêt de l'argile calcinée comme additif cimentaire à la fois performant et durable. Sur le plan environnemental, l'incorporation d'argile calcinée permet une réduction directe des émissions de CO₂ grâce à la diminution du taux de clinker dans le ciment. À titre d'exemple, un taux de substitution pouvant atteindre 5 % permettrait une baisse d'environ 40 kg de CO₂ par tonne de ciment, tout en nécessitant moins d'énergie lors de la fabrication.

Sur le plan technique, l'ajout d'argile calcinée entraîne une légère augmentation de la finesse et de la surface spécifique, une consistance normale plus élevée en raison de sa forte capacité d'absorption d'eau, et une modification modérée des temps de prise. D'un point de vue mécanique, on observe une légère baisse des résistances initiales (à 2 jours), liée à l'effet de dilution du clinker, mais des résistances à 28 jours équivalentes ou supérieures à celles du ciment de référence dès 5 % de substitution. Par ailleurs, la réactivité chimique de l'argile calcinée se manifeste par une consommation progressive de la portlandite, accompagnée de la formation de nouveaux gels C-S-H et C-A-H plus denses, contribuant ainsi à l'amélioration de la microstructure et de la durabilité du matériau.

L'étude a également permis de déterminer qu'un taux de substitution de 5 % constitue le meilleur compromis entre performances mécaniques, réactivité chimique, propriétés physiques acceptables et réduction de l'empreinte carbone.

L'argile calcinée, utilisée à un taux optimisé d'environ 5 %, s'impose comme un additif efficace, durable et respectueux de l'environnement.

Les principaux résultats optimaux obtenus dans cette étude montrent suite le tableau IV-11 sont :

- ❖ Température de calcination 750 °C :
 - Transformation complète de la kaolinite en métakaolinite amorphe (haute réactivité).
 - Évite la recristallisation (perte d'activité) au-delà de 800 °C.
- ❖ Temps de calcination pendant 1 heure :
 - Suffisant pour atteindre la déshydroxylation complète.
 - Bon compromis entre activation et consommation énergétique.
- ❖ Pourcentage d'argile calcinée (substitution du clinker) 5 % :
 - Bon maintien des performances mécaniques (résistance à la compression).
 - Réduction significative de l'empreinte carbone.
 - Limite acceptable sans nécessité d'activateur supplémentaire.

Conclusion générale

D'après ce résultat optimal elle permet d'améliorer la qualité du ciment tout en réduisant son impact écologique. Cette solution présente un fort potentiel d'adoption à grande échelle, grâce à la convergence de ses avantages techniques, économiques et environnementaux, ouvrant la voie à une transition plus durable dans l'industrie cimentière.

Bibliographie

Bibliographie

- [1] I, Akacha, « Impact des Alcalis sur les Performances de Ciment », mémoire de master, université de Biskra, Algérie, 2020.
- [2] thèse en vue de l'obtention du doctorat de l'université de Toulouse (présente et soutenue par Souad Bour égaya)
- [3] CERIB (Centre d'Études et de Recherches de l'Industrie du Béton). *Intérêt des métakaolins dans les bétons*. Document technique, 2017, Disponible en ligne (PDF)
- [4] Scrivener, K. L., Martirena, F., Bishnoi, S., & Maity, S. (2018). Calcined clay limestone cements (LC3). *Cement and Concrete Research*, 114, 49–56. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.08.017>
- [5] Disponible en ligne : <https://www.lafarge.dz/cp-inauguration-cilas> ; consulté le 17/03/2025 ; (13 :05).
- [6] Document de laboratoire chimique de CILAS (1), Norme européenne 197-1.
- [7] A, Ghermaoui, « Effets de certains métaux sur les propriétés physico-chimiques des mortiers de ciment de Béni-Saf sans ou avec ajout de pouzzolane », mémoire de master, université de Tlemcen, Algérie, 2015.
- [8] A. Benaissa, Y. Hassinoui, « Optimisation du Taux Des Incuits Dans le Ciment CEM II/A 42,5 », mémoire de master, université de Ain-Temouchent, Algérie, 2018
- [9] O. Djebbari; « influence des éléments mineurs et majeurs sur la réactivité du clinker » ; mémoire de master, université Mohamed khider, Biskra Algérie (2020).
- [10] disponible en ligne : <https://www.thecanadianencyclopedia.ca/fr/article/minerai-de-fer> ; consulte le 23/03/2025 ; (10 :35).
- [11] disponible en ligne : <http://www.histalu.org/laluminium/les-grandes-etapes-de-production/la-production-daluminium-de-la-bauxite-a-lalumine/> ; consulté le 23/03/2025 ; (11 :25).
- [12] Y. Guttat ; « étude climat chaud sur les performances des bétons autoplaçants à base de pouzzolane naturelle », thèse de doctorat, université Saad Bahleb, Blida Algérie (2020).
- [13] disponible en ligne : [http : // staff. Univ batna2 .dz / sites / default / files / briki _ lyamine / files / technologie_du_beton.pdf](http://staff.univ-batna2.dz/sites/default/files/briki_lyamine/files/technologie_du_beton.pdf) ; consulté le 27/03/2025 ; (16 :55).
- [14] I. Adjtoutah ; F. Bouzidi ;« utilisation de met kaolindan le ciment » ; mémoire de master, université Abderrahman Mira, Algérie (2018).
- [15] S. Husson. ; « étude physicochimique et mécanique des interactions ciment fillers. Application aux mortiers », thèse de doctorat, école nationale supérieure des mines, France, (1991).
- [16] I. Merzougui ;« improuveclinker réactivité - impact on ciment performance » ; mémoire de master,

université Mohamed khider, Biskra Algérie (2020).

[17] Disponible en ligne : <https://www.toutsurlebeton.fr/le-ba-ba-du-beton/le-ciment-composition-et-fabrication/> ; consulté le 28/03/2025 ; (15 :50).

[18] A, Khadraoui, « Etude influence de la teneur en MgO sur les propriétés physico-chimiques et mécanique du ciment », mémoire de master, université de Biskra, Algérie, 2023

[19] Disponible en ligne : <https://di.univblida.dz/xmlui/bitstream/handle/123456789/6030/analyse%20energetique%20comparative.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.

[20] A, Angar, « L'influence des éléments mineurs et majeurs sur la performance du ciment », mémoire de master, université de Biskra, Algérie 2021.

[21] W, Chetti, « Automatisation de système de traitement de l'eau usée (cilas) », mémoire de master, université de Biskra, Algérie 2019.

[22] Document de laboratoire chimique de CILAS

[23] S. MOUMENE, G. ATHAMNIA ; « CIMENT ET CIMENTERIES EN ALGERIE : PRODUCTION ET NORMALISATION » ; Mémoire de Master, Université de Guelma, Algérie (2013).

[24] A. Brahma ; « le béton » ; office des publications universitaires, codification : 2.03.3678 place centrale de Ben-Aknoun Algérie (1992).

[25] A. Belghiti, A. Guendouz, « Préparation théorique du cru et clinker à ciment par le logiciel de gestion de la qualité. Application à la cimenterie de Sidi Moussa Adrar. », mémoire de master, université de Bejaia, Algérie, 2018.

[26] M, Yahia, « Contribution à la valorisation d'un déchet de cimenterie (ciment hydraté) pour l'élaboration d'un nouveau ciment », mémoire de master, université M'sila, Algérie, 2016.

[27] Disponible en ligne : <https://www.infociments.fr/ciments/fabrication-du-ciment-le-process/lhomogeneisation-du-cru>. Consulté le 06/04/2024. 11 :00.

[28] R, Sailaa L'influence de la chaux libre du clinker sur les Propriétés physico-chimiques et mécaniques du ciment *portland* Université Mohamed Boudiaf - M'sila

[29] Disponible en ligne : <https://www.ciments-calcia.fr/fr/implantations-contacts/fabrication-ciment>. Consulté le 06/04/2025. 10 :15.

[30] J. Festa, G. Dreux ; « Nouveau guide du béton et de ses constituants » ; ÉDITIONS EYROLLES 61, bd Saint-Germain 75240 Paris (2007).

[31] A. MADANI ; « ANALYSE DU CIRCUIT DE BROYAGE CUIT A LA CIMENTERIE DE MEFTAH » ; Mémoire de Master, UNIVERSITÉ de BLIDA 1, Algérie (2018).

[32] A. Lamine CHIKOUCHE ; « Analyse et Maîtrise des Risques Associés à la Perte de Flamme et au Ratage d'Allumage dans le Four lors de la fabrication du Ciment Cas de : LAFARGE Ciment de M'sila, Algérie » ; Mémoire de Post-Graduation Spécialisée, École Nationale Polytechnique, Algérie (2018).

[33] Document de laboratoire chimique de CILAS (2), norme européenne 196-2.

- [34] H. MEBARKI ; « Etude comparative des clinkers de l'ouest Algérien : Analyse Physico-chimique et Applications » ; Mémoire de Master, Université TLEMCEM Algérie (2013).
- [35] Disponible en ligne : [https://www.algerie360.com/cimenterie-cilas-biskra-4e-operation - dexportation-de-clinker-vers-lafrique-de-louest/#google_vignette](https://www.algerie360.com/cimenterie-cilas-biskra-4e-operation-dexportation-de-clinker-vers-lafrique-de-louest/#google_vignette). Consulté le 07/04/2025. 14 :35
- [36] Z, Bitar, « Influence de la surface spécifique des ciments aux ajouts minéraux (calcaire) sur le comportement mécanique du mortier », mémoire de master, université M`sil, Algérie, 2016
- [37] D, Delaldja, « Valorisation des déchets industriels dans la formulation des mortiers soumis à des températures élevées », mémoire de master, université de M`sil, Algérie, 2018
- [38] L. AOUIDIDI ; « Caractérisation d'un ciment à base de pouzzolane » ; Mémoire de Master, Université Mohamed Boudiaf, Msila Algérie (2016).
- [39] Ambroise, J, Péra, J, & Rigaud, S. (1994). *Influence of thermal treatment on the pozzolanic activity of kaolinite*. Cement and Concrete Research, 24(3), 469–479. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(94\)90155-4](https://doi.org/10.1016/0008-8846(94)90155-4)
- [40] Ambroise, J., & Péra, J. (2001). *Reactivité pouzzolanique des argiles kaoliniques calcinées*. Matériaux et Constructions, 34(237), 435-440. DOI : 10.1007/BF02482188

Résumés

Cette étude évalue l'effet de l'argile calcinée comme substitut partiel du clinker dans le ciment Portland. Les résultats montrent qu'à 5 %, l'argile calcinée améliore les performances mécaniques à 28 jours, surtout après calcination à 750 °C. Au-delà (25 % et 30 %), les résistances diminuent, notamment à température élevée, en raison d'une dilution excessive et d'une demande en eau accrue. La composition chimique (riche en SiO_2 et Al_2O_3) et la formation de métakaolinite confirment la réactivité pouzzolanique. Le taux optimal de substitution est donc de 5 %, conciliant performance, durabilité et impact environnemental réduit.

Mots-clés : Argile calcinée, Substitution du clinker, Ciment Portland, Réactivité pouzzolanique, Métakaolinite, Résistance à la compression, Température de calcination, Réduction de CO_2 , Propriétés physico-chimiques, Surface spécifique, Hydratation du ciment.

Abstract

This study evaluates the effect of calcined clay as a partial clinker replacement in Portland cement. Results show that at 5% substitution, calcined clay enhances long-term compressive strength, especially when calcined at 750 °C. Higher substitution levels (25% and 30%) lead to decreased strength due to excessive dilution and higher water demand. The chemical composition (rich in SiO_2 and Al_2O_3) and the transformation into reactive metakaolinite confirm the pozzolanic potential. The optimal substitution rate is 5%, offering a balance between mechanical performance, durability, and reduced environmental impact.

Keywords: Calcined clay, Clinker substitution, Portland cement, Pozzolanic reactivity, Metakaolinite, Compressive strength, Calcination temperature, CO_2 reduction, Physico-chemical properties, Specific surface area, Cement hydration.

الملخص

تهدف هذه الدراسة إلى تقييم تأثير استخدام الطين المكلس كبديل جزئي للكلينكر في الأسمنت البورتلاندي. أظهرت النتائج التجريبية أن استبدال 5٪ من الكلينكر بالطين المكلس يؤدي إلى تحسين في المقاومة الميكانيكية بعد 28 يومًا، خاصة عند إجراء التكليس على درجة حرارة 750 درجة مئوية. أما في حال زيادة نسبة الاستبدال إلى 25٪ أو 30٪، فقد لوحظ انخفاض في مقاومة الضغط، ويرجع ذلك إلى تخفيف المكون النشط وزيادة الحاجة إلى الماء. أظهرت التحاليل الكيميائية أن الطين غني بثنائي أكسيد السيليكون (SiO_2) وأكسيد الألمنيوم (Al_2O_3)، كما أكدت تحاليل الأشعة السينية تكون مادة الميتاكاؤولين النشطة بوزولانياً. وبناءً عليه، فإن النسبة المثلى للاستبدال تُقدَّر بـ 5٪، حيث تحقق توازنًا بين الأداء الميكانيكي، والاستدامة، وتقليل الأثر البيئي الناتج عن إنتاج الأسمنت

الكلمات المفتاحية:

الطين المحروق، استبدال الكلنكر، إسمنت بورتلاندي، التفاعل البوزولاني، الميكاكولينيت، مقاومة الانضغاط، درجة حرارة الحرق، تقليل ثاني أكسيد الكربون، الخصائص الفيزيائية والكيميائية، المساحة السطحية، ترطيب الأسمنت

عنوان المشروع:

**Impacts de l'argile calciné sur les propriétés
physique et chimique du ciment
(Nouveau produit comme additif pour améliorer la
qualité du ciment)**

مشروع لنيل شهادة مؤسسة ناشئة في اطار القرار الوزاري 1275

صورة العلامة التجارية



الاسم التجاري

Eco-Clay-Cement

بطاقة معلومات:

حول فريق الإشراف وفريق العمل
1- فريق الإشراف:

فريق الإشراف	
المشرف الرئيسي (01): ساكري عادل	التخصص: هندسة الكيمياء
المشرف الرئيسي (02): بورمل شريفة	التخصص: هندسة المبلورات

2- فريق العمل

فريق المشروع	التخصص	الكلية
الطالب: رواحنه جمال	هندسة الطرائق للبيئة	العلوم والتكنولوجيا

عنوان المشروع: تأثير الطين المحروق على الخواص الفيزيائية والكيميائية للأسمنت (منتج جديد كمادة مضافة لتحسين جودة الأسمنت)

فهرس المحتويات



المحور الأول: تقديم المشروع

المحور الثاني: الجوانب الابتكارية

المحور الثالث: التحليل الاستراتيجي للسوق

المحور الرابع: خطة الإنتاج والتنظيم

المحور الخامس: الخطة المالية

المحور السادس: النموذج الأولي التجريبي

عنوان المشروع: تأثير الطين المحروق على الخواص الفيزيائية والكيميائية للأسمنت (منتج جديد كمادة مضافة لتحسين جودة الأسمنت)

المحور الأول تقديم المشروع



فكرة المشروع:

الإسمنت هو رابط هيدروليكي أساسي في قطاع البناء. إنتاجه، وخاصة إنتاج الكلنكر، يستهلك الكثير من الطاقة ويولد انبعاثات كبيرة من ثاني أكسيد الكربون. يقترح هذا المشروع دراسة وتطوير مادة مضافة للأسمنت تعتمد على أنواع من الطين المحلي المكلس. الهدف هو استخدام هذا الطين المكلس كمادة إسمنتية إضافية (MCS) لتحل جزئيًا محل الكلنكر، وبالتالي تحسين بعض الخواص الفيزيائية (المقاومة الميكانيكية، الديمومة، قابلية التشغيل) والكيميائية للأسمنت، مع السعي لتقليل البصمة البيئية واحتمالية خفض تكاليف الإنتاج.

القيم المقترحة:

- **تحسين جودة الإسمنت:** زيادة محتملة في المقاومة الميكانيكية على المدى الطويل، تحسين الديمومة (مقاومة الكبريتات، تفاعل القلويات مع الركام، تقليل المسامية).
- **منتج صديق للبيئة:** تقليل انبعاثات ثاني أكسيد الكربون بفضل الاستبدال الجزئي للكلنكر (الذي يعد إنتاجه مصدرًا رئيسيًا لثاني أكسيد الكربون). تثمين الموارد الطبيعية المحلية (الطين).
- **أداء اقتصادي:** إمكانية تقليل تكاليف إنتاج الإسمنت باستخدام مادة أقل تكلفة من الكلنكر (يتم التحقق من ذلك بناءً على تكلفة الطين وتكليسها).
- **ابتكار محلي:** تطوير حل يتناسب مع السياق الجزائري باستخدام مواد أولية محلية.

فريق العمل:

فريق المشروع	التخصص	الكلية
رواحنه جمال	هندسة الطرائق للبيئة	العلوم والتكنولوجيا

أهداف المشروع:

- ✓ تحديد وتوصيف أنواع الطين المحلية التي يمكن استخدامها.
- ✓ تحديد الظروف المثلى لتكليس أنواع الطين المختارة لزيادة تفاعلها البوزولاني.
- ✓ تقييم تأثير دمج نسب مختلفة من الطين المكلس على خصائص الإسمنت (زمن الشك، القوام، الانكماش) والملاط/الخرسانة (المقاومة الميكانيكية، الديمومة).
- ✓ تطوير تركيبة مثالية لإسمنت مركب يعتمد على الطين المكلس.
- ✓ تحليل الجدوى الاقتصادية لإنتاج هذه المادة المضافة.
- ✓ اقتراح نموذج إنتاج على نطاق صغير (تجريبي).

عنوان المشروع: تأثير الطين المحروق على الخواص الفيزيائية والكيميائية للأسمنت (منتج جديد كمادة مضافة لتحسين جودة الأسمنت)

السنوات

جدول زمني لتحقيق المشروع:

7	6	5	4	3	2	1		
						✓	الدراسات الأولية: إختيار مقر الوحدة الإنتاجية، تجهيز الوثائق المطلوبة	1
						✓	طلب التجهيزات من الخارج	2
						✓	بناء مقر للإنتاج (المصنع)	3
					✓		تركيب المعدات	4
					✓		اقتناء المواد الأولية	5
				✓			بداية انتاج أول منتج	6

المرحلة 1: البحث المكتبي وتحديد أنواع الطين (12 أسابيع):

- تحليل الأدبيات حول الطين المكلس كمادة إسمنتية إضافية.
- أخذ العينات والتوصيف الأولي لعينات الطين المحلية.

المرحلة 2: تجارب التكليس والتوصيف (8 أسابيع)

- تحديد بروتوكولات التكليس (درجة الحرارة، المدة).
- تكليس عينات الطين.
- التوصيف الفيزيائي-الكيميائي والمعدني للطين المكلس (DRX, XRF, ATG / ATD, Blaine,)

المرحلة 3: صياغة التركيبات وإجراء التجارب على العجائن والملاط (12 أسابيع)

- تحضير تركيبات مختلفة من الإسمنت المركب.
- تجارب على العجائن: القوام، زمن الشك.
- تجارب على الملاط المعياري: المقاومة الميكانيكية (الضغط، الانثناء) في آجال مختلفة

المرحلة 4: تجارب الديمومة والتحسين (4 أسابيع).

- تجارب الديمومة (مثال: النفاذية، مقاومة الكبريتات)
- تحسين التركيبة.

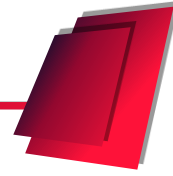
عنوان المشروع: تأثير الطين المحروق على الخواص الفيزيائية والكيميائية للأسمنت (منتج جديد كمادة مضافة لتحسين جودة الأسمنت)

المرحلة 5: التحليل الفني-الاقتصادي وصياغة التقرير (20 أسبوع).

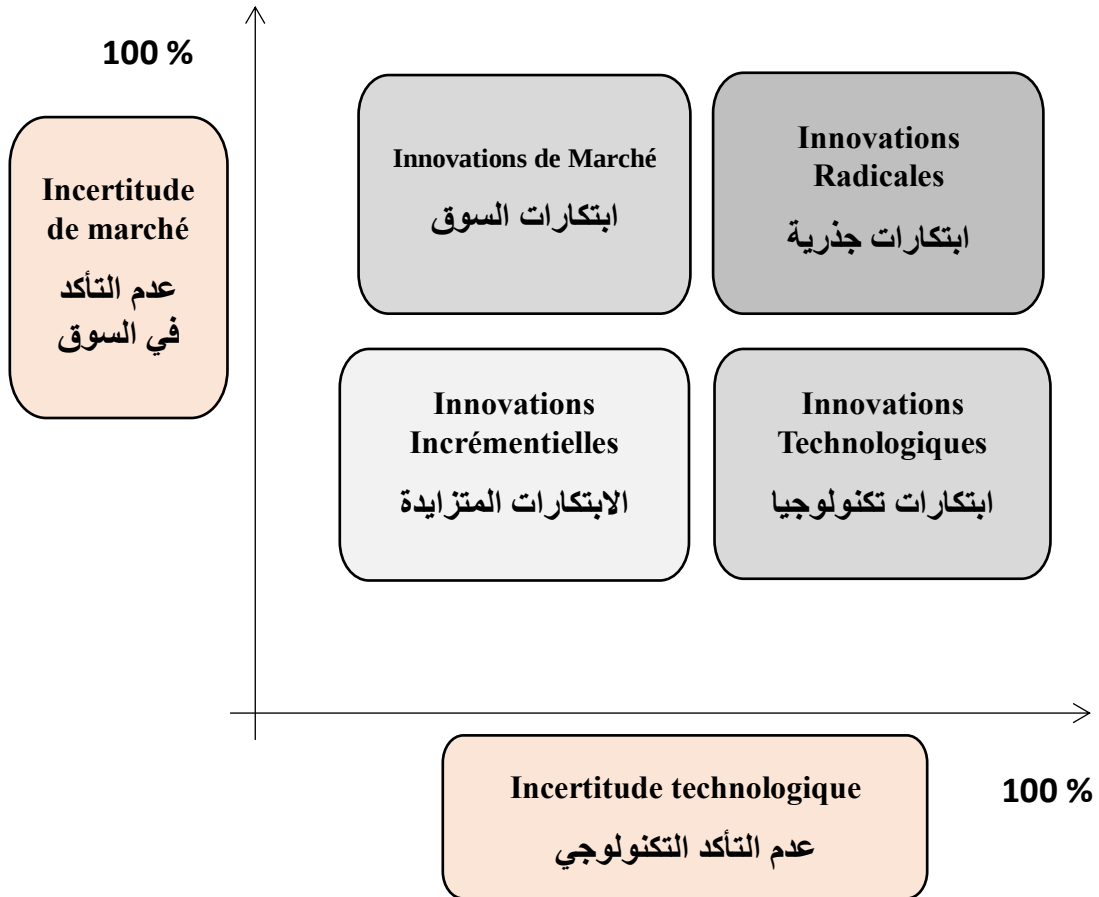
- تحليل التكاليف.
- إعداد نموذج العمل.
- صياغة المذكرة/تقرير المشروع (هذا كمخطط سهمي للمثال، مع تكييف عناوين المراحل)

عنوان المشروع: تأثير الطين المحروق على الخواص الفيزيائية والكيميائية للأسمنت
(منتج جديد كمادة مضافة لتحسين جودة الأسمنت)

المحور الثاني
الجوانب الابتكارية



طبيعة الابتكارات:



وصف الابتكار: يكمن الابتكار في الاستخدام الأمثل لأنواع طين محلية محددة (بعد التوصيف) تُكلس في ظروف متحكم بها لإنتاج مادة إسمنتية إضافية عالية التفاعل. في حين أن استخدام الطين المكلس معروف، يركز هذا المشروع على:

- تثمين مكامن طين جزائرية محددة، قد تكون أقل استغلالاً أو تعتبر منتجات ثانوية
- تحسين عملية التكليس (درجة الحرارة، المدة) بناءً على الطبيعة المعدنية للطين لزيادة النشاط البوزولاني إلى أقصى حد مع تقليل استهلاك الطاقة
- إثبات تحسن ملموس في أداء الإسمنت) مثال: زيادة المقاومة لعوامل خاصة بالسياق المحلي، قابلية تشغيل أفضل لتطبيقات معينة
- تطوير منتج يساهم في صناعة إسمنت أكثر استدامة في الجزائر

مصفوفة الابتكار: حدد موقع ابتكارك. إليك تحليل محتمل

- **عدم اليقين التكنولوجي:** متوسط إلى مرتفع (يعتمد على مدى حداثة نوع الطين وتحسين عملية التكليس).
- **عدم اليقين في السوق:** متوسط (القبول من قبل صانعي الإسمنت، الامتثال للمعايير، القدرة التنافسية للسعر).

عنوان المشروع: تأثير الطين المحروق على الخواص الفيزيائية والكيميائية للأسمنت (منتج جديد كمادة مضافة لتحسين جودة الأسمنت)

نوع الابتكار المحتمل:

- ابتكار تكنولوجي: إذا كانت عملية التكليس أو التوصيف الدقيق للنشاط البوزولاني متقدمة
- ابتكار تراكمي: تحسين منتج موجود (الأسمنت) بإضافة جديدة. يمكن أن يميل نحو ابتكار أكثر أهمية إذا كانت الفوائد الأدائية أو البيئية كبيرة
- ابتكار سوقي: إذا كان ذلك يفتح الطريق أمام أنواع إسمنت خاصة لقطاعات لم يتم تغطيتها بفعالية بعد

عنوان المشروع: تأثير الطين المحروق على الخواص الفيزيائية والكيميائية للأسمنت
(منتج جديد كمادة مضافة لتحسين جودة الأسمنت)

المحور الثالث

التحليل الاستراتيجي للسوق



تحليل PESTEL: (تكييف عوامل المثال مع قطاع الإسمنت ومواد البناء)

<u>العوامل الاجتماعية</u> - الطلب على الإنشاءات المستدامة والصديقة للبيئة. - قبول المواد الجديدة من قبل مهني قطاع البناء والتشييد. - حاجة إلى الإسكان والبنية التحتية.	<u>العوامل الاقتصادية</u> - نمو قطاع البناء - تكلفة المواد الأولية (الطين، الطاقة للتكليس) والكلنكر. - القدرة الشرائية لشركات البناء والمطورين. - تقلبات أسعار الطاقة.	<u>العوامل السياسية</u> - التشريعات المتعلقة بمواد البناء ومعايير الإسمنت - السياسات الحكومية لدعم الابتكار والصناعة المحلية. - خطط تطوير البنية التحتية. - التشريعات البيئية (انبعاثات ثاني أكسيد الكربون، إدارة المحاجر)
<u>العوامل القانونية</u> - معايير وشهادات منتجات الإسمنت (وطنية ودولية). - قانون الملكية الفكرية (براءات اختراع للعملية أو التركيبة). - قوانين حماية البيئة.	<u>العوامل البيئية</u> - الضغط لتقليل البصمة الكربونية لصناعة الإسمنت. - التشريعات المتعلقة باستغلال محاجر الطين - إدارة نفايات البناء وإمكانية إعادة التدوير	<u>العوامل التكنولوجية</u> - التقدم في تقنيات التكليس وتوصيف المواد. - تطوير مواد إسمنتية إضافية منافسة جديدة - رقمنة عمليات الإنتاج ومراقبة الجودة في صناعة الإسمنت

عنوان المشروع: تأثير الطين المحروق على الخواص الفيزيائية والكيميائية للأسمنت (منتج جديد كمادة مضافة لتحسين جودة الأسمنت)

مخطط SWOT:

نقاط القوة (Strengths) - تحسين محتمل لخصائص الإسمنت. - تقليل الأثر البيئي (خفض عامل الكلنكر). - استخدام موارد طبيعية محلية وفيرة وربما منخفضة التكلفة. - خبرة فنية متطورة لدى فريق المشروع - منتج يحتمل أن يتوافق مع المتطلبات المعيارية الجديدة (إسمنت منخفض الكربون).	نقاط الضعف (Weakness) - تكلفة الطاقة لعملية التكليس (يجب التحكم فيها). - تباين جودة مكامن الطين. - الحاجة إلى استثمارات أولية لمعدات التكليس والمراقبة - القبول والتبني من قبل صناعة إسمنت قد تكون محافظة أحياناً - نقص الخبرة في الإنتاج الصناعي والتسويق على نطاق واسع
الفرص (Opportunities) - سوق بناء متنامي (محلياً وإقليمياً). - طلب متزايد على مواد البناء الصديقة للبيئة والمستدامة. - دعم حكومي للابتكار والإنتاج المحلي - إمكانية تطوير أنواع إسمنت خاصة ذات قيمة مضافة عالية - شراكات محتملة مع مصانع الإسمنت القائمة	التحديات (Threats) -- منافسة من مواد إسمنتية إضافية أخرى (الخبث، الرماد المتطاير، البوزولان الطبيعي، إلخ). - تقلب أسعار الطاقة. - تشديد المعايير البيئية التي قد تؤثر على استغلال الطين أو التكليس. - صعوبة الحصول على الشهادات اللازمة بسرعة. - ظهور تقنيات إسمنت بديلة أكثر ابتكاراً.

تحليل القوى الخمس لبورتر (مخطط Porter): (تكيف تحليل المثال مع سوق إضافات الإسمنت)

- 1. تهديد الداخلين الجدد: - متوسط:** يتطلب خبرة فنية، الوصول إلى مكامن طين ذات جودة، واستثمارات في معدات التكليس. الحواجز المعيارية يمكن أن تلعب دوراً أيضاً.
- 2. القدرة التفاوضية للعملاء (مصانع الإسمنت، شركات البناء الكبرى): - مرتفعة:** غالباً ما يكون العملاء كبار الحجم، وقد يكونون حساسين للأسعار ومتطلبين بشأن جودة وتوحيد التوريد.
- 3. القدرة التفاوضية للموردين (موردي الطين، الطاقة، المعدات): - متوسطة:** تعتمد على توفر ونوعية الطين المطلوب. تكلفة الطاقة عامل رئيسي.
- 4. تهديد المنتجات البديلة (مواد إسمنتية إضافية أخرى، الإسمنت التقليدي بدون إضافات، تقنيات مواد رابطة جديدة): - مرتفع:** يوجد العديد من المواد الإسمنتية الإضافية بالفعل، والبحث والتطوير في مجال المواد الرابطة نشط.
- 5. شدة المنافسة الحالية: - مرتفعة:** يهيمن على سوق الإسمنت مجموعات كبيرة، والعديد من الأشخاص يقدمون بالفعل حلولاً لإسمنت أكثر صداقة للبيئة أو أداءً.

تجزئة السوق:

1. السوق المستهدف:

- مصانع الإسمنت (لدمج الطين المكلس في تركيبات الإسمنت المركب الخاصة بهم) .

عنوان المشروع: تأثير الطين المحروق على الخواص الفيزيائية والكيميائية للأسمنت (منتج جديد كمادة مضافة لتحسين جودة الأسمنت)

- محطات الخرسانة الجاهزة (لإضافة مباشرة في الخلط) .

- مصنعو منتجات الخرسانة مسبقة الصنع.

2. السوق المحتمل :

- شركات البناء الكبرى لمشاريع محددة تتطلب خرسانة عالية الأداء أو منخفضة البصمة الكربونية.

- مشاريع البنية التحتية العامة (طرق، جسور، سدود).

- سوق التصدير إذا كان المنتج تنافسيًا ومعتمدًا.

تحليل المنافسين:

1. المنافسون المباثرون:

- منتج وموردو مواد إسمنتية إضافية أخرى (خبث الأفران العالية الحبيبي، الرماد المتطاير، البوزولان الطبيعي، الميكاكولين الصناعي، غبار السيليكا) .

- شركات أو مختبرات أخرى تطور حلولاً مماثلة تعتمد على الطين المكلس.

2. المنافسون غير مباثرون:

- مصنعو الإسمنت البورتلاندي التقليدي (الذين قد لا يرغبون في تعديل تركيباتهم).

- الشركات التي تطور مواد رابطة بديلة جديدة تمامًا (مثل الجيوبوليمرات، إسمنتات الكبريتو-ألومينات).

- الحلول التي تهدف إلى تقليل تأثير الخرسانة بوسائل أخرى (تحسين الركام، المضافات الكيميائية).

المزيج التسويقي (7P/4P) :

المنتج: مادة مضافة للإسمنت تعتمد على الطين المكلس. مواصفات فنية واضحة (النعومة، النشاط البوزولاني، التأثير على خصائص الإسمنت). تعبئة وتغليف مناسبان للحفظ والمناولة.

السعر: يحدد بناءً على تكاليف الإنتاج، القيمة المضافة المدركة من قبل العميل، وأسعار المواد الإسمنتية الإضافية المنافسة. استراتيجية اختراق أو قيمة.

التوزيع (المكان) : البيع المباشر لمصانع الإسمنت ومحطات الخرسانة الكبرى. شراكات مع موزعي مواد البناء. لوجستيات محسنة.

الترويج:

- وثائق فنية مفصلة، أوراق بيانات السلامة

- المشاركة في المعارض المهنية للبناء ومواد البناء

- المنشورات العلمية والفنية

- العروض التوضيحية والتجارب في مواقع تجريبية لدى العملاء المحتملين

- التسويق الرقمي (موقع ويب، عروض فنية عبر الإنترنت)

الأفراد (Personnel) : فريق فني وتجاري مؤهل لتقديم المشورة للعملاء وضمان المتابعة.

العمليات (Process) : عمليات طلب وتسليم ودعم فني واضحة وفعالة. إدارة جودة صارمة.

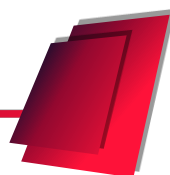
عنوان المشروع: تأثير الطين المحروق على الخواص الفيزيائية والكيميائية للأسمنت
(منتج جديد كمادة مضافة لتحسين جودة الأسمنت)

الدليل المادي (Physical Evidence) : عينات المنتج، تقارير اختبار معتمدة، شهادات (إذا تم الحصول عليها)، دراسات حالة لمشاريع تستخدم المنتج

نوع الترويج	تكلفة الترويج
لافتات اشهارية	500000 دج
مقابلات شخصية	10000 دج
الترويج في مواقع التواصل الاجتماعي	10000 دج
المجموع	520000 دج

عنوان المشروع: تأثير الطين المحروق على الخواص الفيزيائية والكيميائية للأسمنت (منتج جديد كمادة مضافة لتحسين جودة الأسمنت)

المحور الرابع خطة الإنتاج والتنظيم



موقع الإنشاء (لوحة تجريبية أو إنتاجية) :

يتم اختيار الموقع حسب الملائمة لطبيعة المشروع وكذلك حسب توفر الوعاء العقاري لدى الدولة المعروف ب: (العقار الصناعي لدعم المؤسسات) ومن هنا يستحسن ان يكون في دائرة لوطاية او جمورة للقرب من مصانع الاسمنت وتوفر المادة الأولية وكذلك توفر الكهرباء والغاز وايضا توفر النقل بنوعيه (السكة الحديدية والنقل عن طريق الشاحنات)

الموقع:

- منطقة صناعية قريبة من مكامن الطين المحددة

- البنية التحتية للنقل (طرق، سكك حديدية)

- العملاء المحتملين (مصانع الإسمنت)

- الوصول إلى الطاقة (غاز، كهرباء)

مبررات اختيار الموقع:

تقليل تكاليف نقل المواد الأولية والمنتج النهائي، توفر اليد العاملة، التأزر مع الصناعات الأخرى

احتياجات المشروع:

1. احتياجات المواد الأولية:

الإحتياج	الكمية (طن)	السعر الوحدوي (دج) (طن)	السعر الاجمالي (دج)
الطين الخام (الكمية، النوع، تكلفة الاستخراج/الشراء،)	100000	6737	673700000
السعر الاجمالي الكلي			673700000

الأرض لانحاز المشروع:

العقار	المساحة	المبلغ في العام
الأرض	50000 متر مربع	150000000

عنوان المشروع: تأثير الطين المحروق على الخواص الفيزيائية والكيميائية للأسمنت
(منتج جديد كمادة مضافة لتحسين جودة الأسمنت)

بناء مقر المصنع:

المقر	المبلغ الاجمالي
الهيكل	150000000

سعر السجل التجاري: 40000 دج
النقل:

وسائل النقل (شاحنة)	2000000. دج
---------------------	-------------

احتياجات المعدات والآلات:

الإحتياج	الكمية	السعر الوحدوي (دج)	السعر الاجمالي (دج)
كسارة / طاحونة لتقليل حجم الطين الخام	1	2251350	2251350
فرن تكليس	1	30018000	30018000
نظام تبريد للطين المكلس	1	12007200	12007200
طاحونة نهائية دقيقة للوصول إلى النعومة المطلوبة	1	12757650	12757650
صوامع تخزين (للطين الخام، الطين المكلس)	1	1500900	1500900
معدات مناولة (ناقلات، لودر)	2	3752250	7504500
PSD, XRF, XRD	1	30018000	30018000
شاحنة (15طن)	2	10000000	20000000
شارحور	1	25000000	25000000
السعر الاجمالي الكلي	/	/	141057600

3. احتياجات المعدات المكتبية والمخبرية:

الإحتياج	الكمية	السعر الوحدوي (دج)	السعر الاجمالي (دج)
المكتب ولوازمه	2	30.000	60.000
الطابعة	1	.45000	.45000
الانترنت والهاتف	/	/	30000
الفاكس	1	.12000	12.000
حاسوب	2	.45000	90.000
مكيف	2	.150000	30.0000

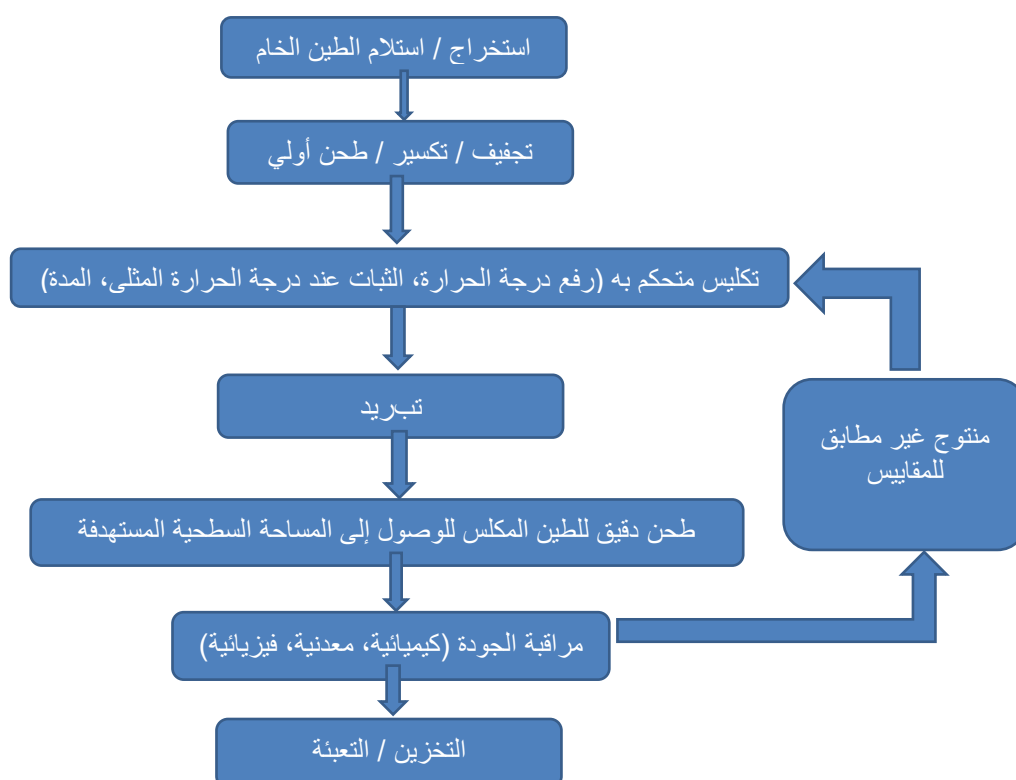
عنوان المشروع: تأثير الطين المحروق على الخواص الفيزيائية والكيميائية للأسمنت
(منتج جديد كمادة مضافة لتحسين جودة الأسمنت)

1000000	/	/	معدات مختبر (أواني زجاجية، مواد استهلاكية، مواد كيميائية للتحاليل)
1537000	/	/	السعر الاجمالي الكلي

4. احتياجات الكهرباء والغاز والوقود والماء:

الاحتياج	السعر الاجمالي في السنة
الكهرباء والغاز الطبيعي	10280955
وقود	7830000
الماء (بئر ارتوازي ولوازمه)	10000000
المجموع	28110955

عملية الإنتاج و التطوير(المخطط) :



الاحتياجات من اليد العاملة (الوحدة تجريبية) :

- عدد المناصب التي يمكن أن يخلقها المشروع: مشروعنا يخلق حوالي 29 مناصب شغل مباشر.
- طبيعة ونوعية اليد العاملة:

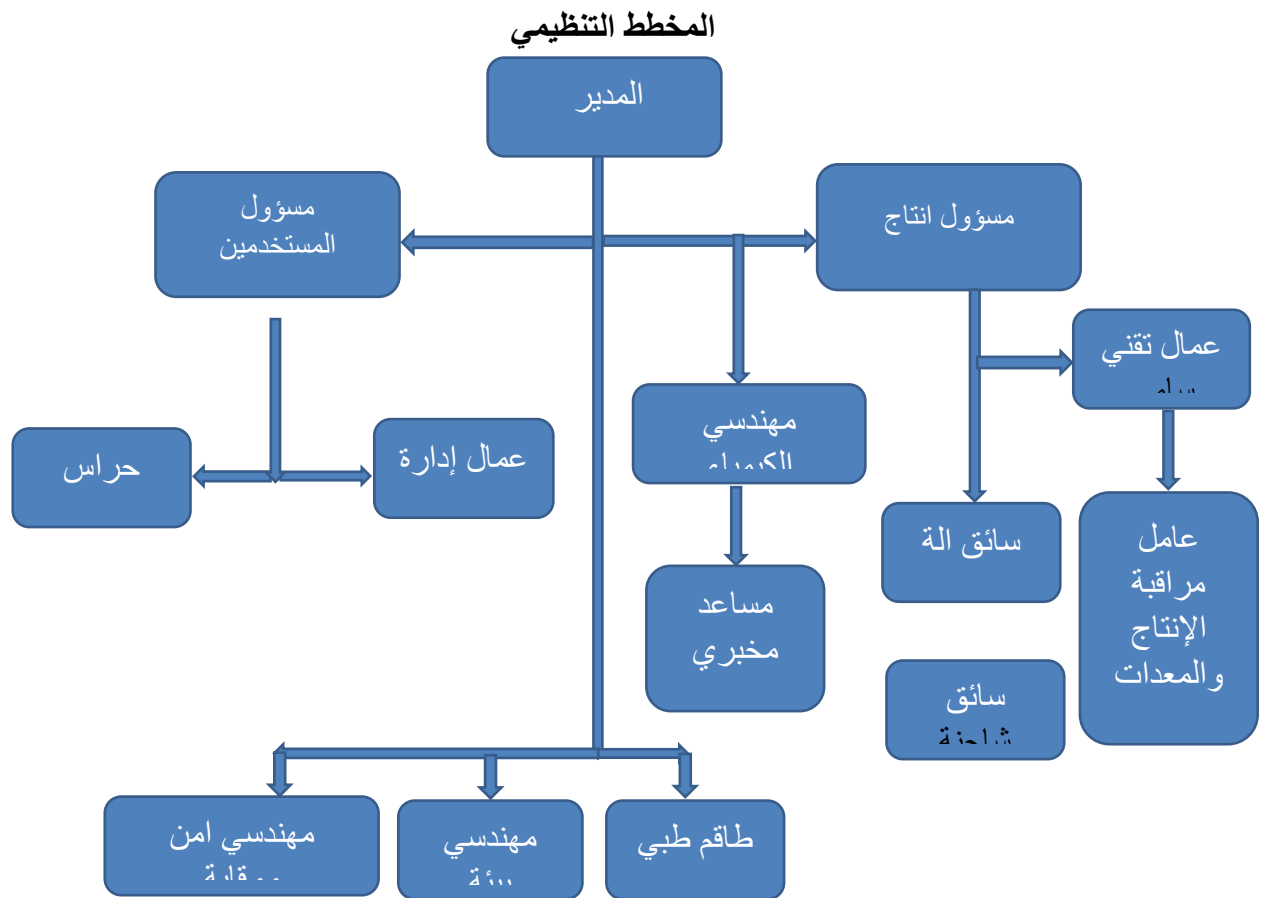
طبيعة اليد العاملة مبينة في الجدول ادناه مع الأجور

عنوان المشروع: تأثير الطين المحروق على الخواص الفيزيائية والكيميائية للأسمت
(منتج جديد كمادة مضافة لتحسين جودة الأسمت)

تكاليف أجور العمال في السنة:

نوع العمل	العدد	خصائصه	مهامه	الاجر الشهري (دج)	مجموع الأجر في السنة (دج)
المدير	1	ماستر إدارة اعمال	إدارة الشركة	80 000	960 000
مسؤول المستخدمين	1	ماستر إدارة اعمال	تسير المستخدمين	60 000	72 0000
عمال إدارة	3	تكوين إدارة	التنسيق مهام الإدارة	40 000	480 000
مسؤول انتاج	1	ماستر في جميع التخصصات المتعلقة بالإنتاج	مراقبة المنتج	60 000	720 000
عمال تقني سامي	3	خبرة في المجال	الصيانة-تصميم وتنفيذ التركيبات الالية- عمليات الانتاج	40 000	480 000
عامل مراقبة الإنتاج والمعدات	10	خبرة في المجال	مراقبة المنتج والمعدات	35 000	420 000
مهندسي بيئة	1	خبرة في المجال	معالجة نفايات صادرة من المصنع	50 000	600 000
مهندسي الكيمياء الصناعية	1	خبرة في المجال	مراقبة جودة المنتج	50 000	600 000
مساعد مخبري	1	تقني سامي	مساعدة المهندس الكيميائي	30 000	360 000
طاقم طبي	1	خبرة في المجال	قيام بالإسعافات الأولية	40 000	480 000
مهندسي امن ووقاية	1	خبرة في المجال	تحليل المخاطر	40 000	480 000
سائق الة	1	رخصة السياقة +شهادة في الاختصاص	تسوية مخزون المادة الأولية وتغذية الطاحونة	50 000	600 000
سائق شاحنة	2	رخصة السياقة	نقل المواد الأولية والمنتج	40 000	480 000
حراس	2	خبرة في المجال	الحفاظ على الامن العام لشركة	25 000	300 000
المجموع	29	/	/	640 000	7680 000

عنوان المشروع: تأثير الطين المحروق على الخواص الفيزيائية والكيميائية للأسمنت
(منتج جديد كمادة مضافة لتحسين جودة الأسمنت)



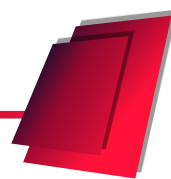
الشراكات الرئيسية:

أهم الشراكات في مشروعنا كانت من الموردين لأهميتهم في إنجاح المشروع منهم:

- الوكالة الوطنية للمقاول الذاتي ANAD
- الصندوق الوطني لدعم مؤسسات الناشئة
- الوكالة الوطنية لدعم تشغيل الشباب ANSEJ

عنوان المشروع: تأثير الطين المحروق على الخواص الفيزيائية والكيميائية للأسمت
(منتج جديد كمادة مضافة لتحسين جودة الأسمت)

المحور الخامس
الخطة المالية



1. التكاليف والأعباء:

التكاليف الاستثمارية:

الأصول	التكلفة بدينار جزائري للسنة
المعدات والآلات	141 057 600
اللوازم المكتبية	1 537 000
النقل (العمال)	2 000 000
المباني	150 000 000
العقار	150 000 000
السجل التجاري	40 000
المجموع	443251300

التكاليف التشغيلية:

الأصول	التكلفة بدينار جزائري للسنة
المواد الأولية	673 700 000
أجور العمال	7680 000
الكهرباء والغاز والوقود والماء	28 110 955
الترويج	000 520
المجموع	710010955

2. الهيكل التمويلي:

البيان	النسبة	القيمة بالدينار جزائري
أموال خاصة	0,052 بالمئة	600 000
القروض	99,95 بالمئة	1 152 662 255
المجموع	100 بالمئة	1 153 262 255

**عنوان المشروع: تأثير الطين المحروق على الخواص الفيزيائية والكيميائية للأسمت
(منتج جديد كمادة مضافة لتحسين جودة الأسمت)**

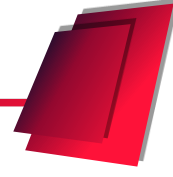
- الصندوق الوطني لدعم المؤسسات الناشئة ASF.

- الوكالة الوطنية لدعم تشغيل الشباب ANSEJ

	Réalisati on	Prévision				
Produit A destiné client	N	N+1	N+2	N+3	N+4	N+5
Quantité produit A (طن)	105000	110000	120000	130000	140000	150000
Prix HT prouduit A (دج/طن)	7000	7500	8000	8500	9000	9500
Ventes produit A	735000000	825000000	960000000	850000000	990000000	1140000000
Chiffre d'affaires global	24989045	114989045	249989045	394989045	549989045	714989045

عنوان المشروع: تأثير الطين المحروق على الخواص الفيزيائية والكيميائية للأسمنت (منتج جديد كمادة مضافة لتحسين جودة الأسمنت)

المحور السادس النموذج الأولي التجريبي



وصف النموذج الأولي أو التجارب:

النموذج الأولي " في هذه الحالة هو الطين المكلس المحسن نفسه، وكذلك عينات الإسمنت/الملاط/الخرسانة المصاغة بهذه المادة المضافة

- وصف الطين الخام المختار (الأصل، النوع)
- وصف بروتوكول التكليس المستخدم (درجة الحرارة، المدة، نوع فرن المختبر)
- وصف طرق توصيف الطين المكلس (التوزيع الحبيبي، المساحة السطحية Blaine، التحليل الكيميائي بـ XRF، التحليل المعدني بـ DRX، اختبار النشاط البوزولاني وفقًا للمعايير المعمول بها، مثال Chapelle : المعدل، R3)
- (اختياري) وصف تجارب الديمومة (مثال : النفاذية للماء، مقاومة الكبريتات، الانكماش)
- وصف التجارب المعيارية التي أجريت على العجائن والملاط (القوام، زمن الشك، المقاومة الميكانيكية للضغط والانثناء عند 7، 28، 90 يومًا)

النتائج المتوقعة / المحققة (ملخص) :

التوقعات: الحصول على طين مكلس ذي نشاط بوزولاني عالٍ. إثبات تحسن في المقاومة الميكانيكية (خاصة على المدى الطويل) و/أو خصائص الديمومة للإسمنت المركب مقارنة بإسمنت شاهد. تأكيد إمكانية استبدال X% من الكلنكر دون فقدان الأداء، أو حتى مع تحسن

النتائج : (قدم هنا النتائج الرئيسية التي تم الحصول عليها خلال تجاربك: خصائص الطين المكلس، أداء الملاط، إلخ. استخدم جداول ورسوم بيانية واضحة)

صور / مخططات / رسوم بيانية:

- صور لعينات الطين الخام والمكلس :



**عنوان المشروع: تأثير الطين المحروق على الخواص الفيزيائية والكيميائية للأسمنت
(منتج جديد كمادة مضافة لتحسين جودة الأسمنت)**

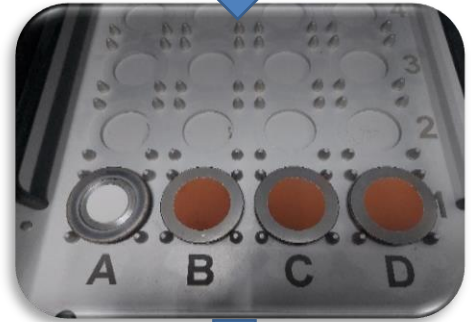
- صور لعينات الملاط قبل/بعد الكسر:



مخطط لعملية التكليس في المختبر

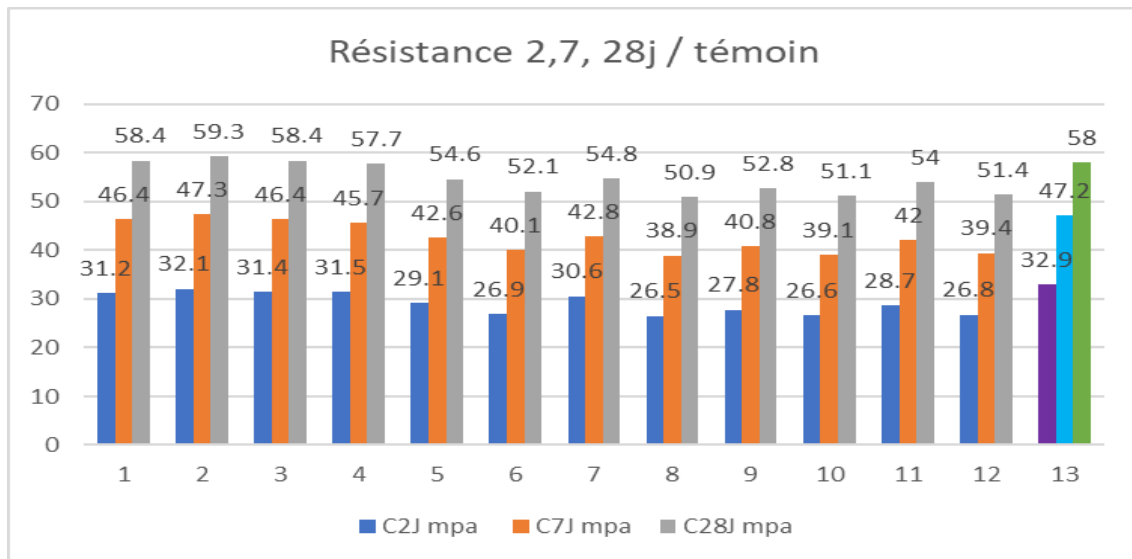


عنوان المشروع: تأثير الطين المحروق على الخواص الفيزيائية والكيميائية للأسمنت
(منتج جديد كمادة مضافة لتحسين جودة الأسمنت)



عنوان المشروع: تأثير الطين المحروق على الخواص الفيزيائية والكيميائية للأسمنت (منتج جديد كمادة مضافة لتحسين جودة الأسمنت)

- رسوم بيانية مقارنة للمقاومة الميكانيكية (إسمنت شاهد مقابل إسمنت مع طين مكلس) :



- جدول التحاليل بالأشعة السينية للطين بعد التكليس (DRX)

Alum_Su m	Belite_Su m	Alite_Su m	Ferri t	Gypsu m	Calcit e	Portlon di	Hemi _Hydra	Qu art z	Dolomi te	SO ₃ _XR D	fCaO_XR D	CO ₂ _XR D
4.93	10.72	64.3	11.16	3.09	1.23	1.33	0	1.01	0	2.16	1.28	0.54
5.01	11.28	64.15	11.03	2.67	1.02	1.29	0.02	1.18	0	2.05	1.17	0.45
5.12	11.53	65.06	10.86	2.66	0	1.26	0.1	1.04	0	2.05	1.24	0
5.07	11.6	65.29	11.17	2.6	0	1.16	0.08	0.9	0	2.01	0.96	0
4.57	9.23	57.51	9.44	2.34	3.15	1.29	0	7.43	0	3.39	1.13	1.39
4.67	8.96	57.53	9.78	2.49	2.57	1.26	0	7.54	0	3.58	0.99	1.13
5.28	11.5	57.7	9.69	2.05	0	1.3	0	6.92	0	3.48	1.2	0
4.88	9.5	59.11	10.71	2.32	1.69	0.89	0	6.15	0	3.29	0.79	0.74

عنوان المشروع: تأثير الطين المحروق على الخواص الفيزيائية والكيميائية للأسمنت
(منتج جديد كمادة مضافة لتحسين جودة الأسمنت)

4.13	8.61	54.45	9.79	2.22	3.62	1.48	0	9.5 3	0	3.98	1.3	1.59
4.16	8.36	56.21	9.76	2.18	2.63	0.96	0	9.8 6	0	3.86	0.92	1.16
5.19	10.1	56.54	9.59	2.22	0	0.94	0	9.2 8	0	3.89	0.94	0
5.27	10.72	56.13	9.95	2.25	0	0.92	0	8.7 6	0	3.92	0.75	0
4.89	11.5	64.34	11.11	2.87	1.32	1.82	0.04	0.0 5	0	1.95	1.71	0.58

عنوان المشروع: تأثير الطين المحروق على الخواص الفيزيائية والكيميائية للأسمنت
(منتج جديد كمادة مضافة لتحسين جودة الأسمنت)

الملحق

نموذج العمل التجاري

نموذج العمل التجاري

القيمة المقترحة (Value Proposition) - مادة مضافة للأسمنت عالية الأداء تحسن الخواص الميكانيكية وديمومة الخرسانة - حل لإنتاج إسمنت ذي بصمة كربونية أقل (تقليل الكنكر) - تأمين الموارد المعدنية المحلية - المساهمة في البناء المستدام - إمكانية خفض التكاليف لمنتجات الإسمنت (حسب التكلفة النهائية للمادة المضافة)	الأنشطة الرئيسية (Key Activities) - تحديد مصادر الطين وتوصيفها - تحسين وتنفيذ عملية التكليس - الطحن الدقيق ومراقبة الجودة - البحث والتطوير للتحسين المستمر للمنتج وتطبيقات جديدة - التسويق الفني والبيع - الدعم الفني للعملاء	شركاء الرئيسيون (Key Partners) - موردو الطين (المحاجر) - مختبرات البحث الجامعية (للبحث والتطوير المستمر، التوصيف) - مصانع الإسمنت (للتجارب على نطاق صناعي، العملاء الأوائل المحتملون) - موردو معدات التكليس والطحن - هيئات الاعتماد والشهادات
موارد الأساسية (Key Resources) - الوصول إلى مكامن طين ذات جودة - منشآت ومعدات التكليس والمختبر - الخبرة الفنية والخبرة في علوم المواد وكيمياء الإسمنت - براءات الاختراع أو الملكية الفكرية للعملية (إذا كان ذلك ممكناً) - موارد بشرية مؤهلة	شرائح العملاء (Customer Segments) - صناع الإسمنت - منتجو الخرسانة الجاهزة (BPE) - مصنعو العناصر الخرسانية مسبقة الصنع - شركات البناء الكبرى والهندسة المدنية	العلاقات مع العملاء (Customer Relationships) - شراكات فنية وتطوير مشترك مع مصانع الإسمنت - مساعدة فنية وتدريب على استخدام المنتج - عقود توريد طويلة الأجل - خدمة ما بعد البيع
صادر الإيرادات (Revenue Streams) - بيع مادة الطين المكلس المضافة (بالطن) - خدمات استشارية وخبرة فنية (محتمل) - تراخيص التكنولوجيا (إذا كانت العملية محمية ببراءة اختراع ومصدرة للخارج)	هيكل التكاليف (Cost Structure) - تكاليف البحث والتطوير - تكاليف شراء/استخراج الطين - تكاليف الطاقة (تكليس، طحن) - تكاليف الاستثمار واستهلاك المعدات - تكاليف اليد العاملة - تكاليف التسويق والبيع - تكاليف اللوجستيات والتخزين	نوات التوزيع (Channels) - البيع المباشر للصناعيين - شبكة توزيع متخصصة في مواد البناء (محتمل) - منصة عبر الإنترنت للمعلومات الفنية والطلبات (محتمل)

