



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
People's Democratic Republic of Algeria
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministry of Higher Education and Scientific Research
جامعة عبد الحميد بن باديس - مستغانم
University Abdelhamid Ibn Badis - Mostaganem
كلية العلوم والتكنولوجيا
Faculty of Sciences and Technology
قسم الهندسة المدنية
Civil engineering department



N° d'ordre : M/GCA/2025

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE MASTER ACADEMIQUE

Filière : Génie Civil

Option : Matériaux en Génie Civil

Thème :

**Elaboration d'un mortier à base d'un ciment expiré
traité thermiquement**

Présenté par :

- BENTAHAR Mohamed Aymen
- BOUZID Abderrahmene

Soutenu le 19/06/2025 devant le jury composé de :

Président : Pr MEBROUKI Abdelkader

Examinatrice : Dr MOSTEFA Fouzia

Encadrante : Dr GUERZOU Tourkia

Année Universitaire : 2024/2025

REMERCIEMENT

Nous tenons tout d'abord à remercier le bon dieu de nous avoir guidés et donnée la force et la volonté pour atteindre notre objectif.

Nous tenons à remercier tous ceux et celle qui de loin ou de près a contribué à finaliser ce modeste travail qu'on espère qu'il sera à la hauteur de leur engagement.

Un grand merci à **Mr MEBROUKI Abdelkader** qui a accepté de lire notre travail, et pour ses précieux conseils. On le remercie énormément pour tout le temps qu'il nous a consacré, et qui nous a fait l'honneur de présider le jury.

Un grand merci à **Mme MOSTEFFA Fouzia** qui nous fait l'honneur d'être présent parmi les membres de jury et avoir accepter d'examiner ce travail.

Un énorme et chaleureux merci à **Mme GUERZOU Tourkia** qui a su nous faire partager son savoir-faire et sa rigueur scientifique, pour son aide précieux, son disponibilité, son encouragement et ces conseils durant toute la durée de notre travail.

Nos remerciements vont également à tous les laboratoires qui ont contribué à ce travail, LCTPE, LMPC et les laboratoires pédagogiques de l'université de.

Nous sommes reconnaissants à l'ensemble des enseignants qui ont contribués à notre formation avec beaucoup de dévouement et de compétence.

TABLE DES MATIERES

Remerciement	
Table des matières	I
Liste des figures	V
Liste des tableaux.....	VI
Résumé.....	1
Abstract.....	2
ملخص	3
Introduction générale	5

PARTIE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

CHAPITRE 1 : LE CIMENT

1. Définition	8
2. Constituants du ciment	9
3. Fabrication.....	9
a. Extraction et concassage.....	9
b. Préparation du cru.....	9
➤ Voie sèche (la plus utilisée)	9
➤ Voie humide.....	9
➤ Voies semi-sèche et semi-humide.....	10
c. Cuisson ou clinkérisation	10
4. Les paliers de température pendant la clinkérisation	10
5. Types de ciments	12

CHAPITRE 2 : CIMENT EXPIRE

1. Mesures de conservation pour préserver la qualité du ciment	14
2. Signes de dégradation du ciment et précautions à observer	14
3. Impact de l'utilisation de ciment expiré sur les performances mécaniques des matériaux. 15	
4. Conclusion	17
AXE DE RECHERCHE ET PROBLEMATIQUE.....	20

PARTIE II: MATERIAUX ET METHODES

CHAPITRE 1 : MATERIAUX UTILISES

1. Introduction	23
2. Matériaux utilisés	23
a) Le ciment.....	23
b) Granulats.....	24
c) Fillers calcaires.....	27
d) Substitution.....	27
e) Eau de gâchage:.....	28
3. Formulations adoptés des mortiers.....	29
a) Mortiers normal (témoin)	29
b) Mortiers avec ajout (ciment expiré) :	29
4. Conclusion :.....	29

CHAPITRE 2 : METHODES EXPERIMENTALES

1. Introduction.....	31
2. Essais de caractérisations physiques des matériaux.....	31
a) Analyse granulométrique (EN 933-1 et EN 933-2).....	31
b) Module de finesse (NF P18-304).....	32

c) Equivalent de sable (NF P18-598).....	32
d) La masse volumique apparente.....	33
e) La masse volumique absolue des sables.....	34
f) Pourcentage des fines (NF P 18 301).....	35
g) Absorption [NF P 18-554(gravillon) et NF P 18-555(sable)].....	35
h) La masse volumique absolue de Ciment.....	35
i) Consistance du ciment (NF EN 196-3).....	36
j) Temps de début et fin de prise (NF EN 193-3).....	37
3. Préparation et confection des éprouvettes	38
4. Essais de caractérisations physiques des mortiers	38
a) à l'état frais (La maniabilité)	38
5. Méthode de coulage des éprouvettes	40
6. Essais de caractérisations mécaniques des mortiers	40
a) Essai de traction par flexion par trois points.....	40
b) Essai de compression.....	41
7. Détermination de l'indice d'activité Pouzzolanique.....	42
8. Absorption d'eau par capillarité	43
9. Conclusion	43

PARTIE III: ANALYSE DES RESULTATS

CHAPITRE 1 : RESULTATS ET INTERPRETATIONS

1. INTRODUCTION	45
2. NOMENCLATURE	45
3. RESULTATS ET ANALYSE	45
a) CARACTERISTIQUE DU MORTIER A L'ETAT FRAIS (MANIABILITE).....	45
b) CARACTERISTIQUE DU MORTIER A L'ETAT DURCI	46

➤ Absorption d'eau	46
➤ Résistance à la traction par flexion	47
➤ Résistance à la compression	49
➤ Indice d'activité pouzzolanique	50
4. CONCLUSION.....	51
CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVE.....	53
REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE	56

TABLE DES FIGURES

PARTIE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

CHAPITRE 1 : LE CIMENT

Figure 1 : Fabrication de ciment	10
--	----

PARTIE II: MATERIAUX ET METHODES

CHAPITRE 1 : MATERIAUX UTILISES

Figure 1 : Granulométrie des sables non corrigés	26
Figure 2: L'analyse des sables non corrigés et sable corrigé.	27
Figure 3: Préparation de ciment expiré	27

CHAPITRE 2 : METHODES EXPERIMENTALES

Figure 1: La série de tamis.	31
Figure 2: Essai d'équivalent de sable.	33
Figure 3: La masse volumique apparente du ciment.	34
Figure 4: Les masses volumiques absolues à l'aide d'une éprouvette graduée	34
Figure 5: Consistance de ciment.	37
Figure 6: Maniabilimètre B	38
Figure 7: Principe de fonctionnement du maniabilimètre B	39
Figure 8: Moule prismatique	40
Figure 9: Essai de traction par flexion.....	41
Figure 10: Essai de compression.....	42

PARTIE III: ANALYSE DES RESULTATS

CHAPITRE 1 : RESULTATS ET INTERPRETATIONS

Figure 1: Histogramme de temps d'écoulement en seconde	46
Figure 2: Résultats d'absorption d'eau par capillarité.....	47
Figure 3: Courbe de résistance à la traction des différents mortiers	48
Figure 4: Histogramme de résistance à la traction des différents mortiers	48
Figure 5: Courbe de résistances à la compression des différentes éprouvettes.....	49
Figure 6: Histogramme de résistance à la compression	50

TABLE DES TABLEAUX

PARTIE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

CHAPITRE 1: LE CIMENT

Tableau 1 : Principaux paliers de température lors du processus de clinkérisation et transformations associées	12
--	----

CHAPITRE 2: CIMENT EXPIRE

Tableau 2 : Propriétés d'un ciment expiré	15
---	----

PARTIE II: MATERIAUX ET METHODES

CHAPITRE 1 : MATERIAUX UTILISES

Tableau 1: Caractéristique effectué dans le laboratoire.	23
Tableau 2: Analyse chimique selon la fiche technique.	24
Tableau 3: Propriétés physiques selon la fiche technique.....	24
Tableau 4: Aperçu visuel des sables.....	25
Tableau 5: Caractéristiques physiques des granulats lavés obtenues par l'étude expérimentale..	25
Tableau 6: Caractéristique d'identification effectué dans le laboratoire.....	28
Tableau 7: Analyse chimique selon la fiche technique.	28
Tableau 8: Propriétés physiques selon la fiche technique.....	28
Tableau 9 : La composition des mortiers	29

CHAPITRE 2 : METHODES EXPERIMENTALES

Tableau 1 : Mode de malaxage de pâte de ciment.	36
Tableau 2: Séquences de malaxage.....	38
Tableau 3: Classe de consistance selon la durée d'écoulement	39

PARTIE III: ANALYSE DES RESULTATS

CHAPITRE 1 : RESULTATS ET INTERPRETATIONS

Tableau 1: Résultats de temps d'écoulement en seconde	45
Tableau 2: Résultats d'absorption d'eau par capillarité	46
Tableau 3: Valeurs des résistances à la traction par flexion	47
Tableau 4: Résultats des mesures des résistances à la compression en fonction de temps des bétons ordinaires	49
Tableau 5: Résultats des mesures de l'indice d'activité pouzzolanique	50

RESUME

Le secteur de la construction, essentiel au développement économique et social, rencontre des défis majeurs en de durabilité, à la gestion des ressources et à la réduction de son impact environnemental, notamment à cause de forte émission de carbone liée à la production de ciment.

Le gaspillage de ciment expiré, dû à un mauvais stockage, entraîne des transformations chimiques qui détériorent ses propriétés, rendant son réemploi difficile. Ce phénomène engendre des pertes économiques et environnementales importantes.

Ce travail de recherche vise à étudier la possibilité d'incorporation des taux de 10%, 15%, 20% et 25% de ce ciment traité thermiquement à 200°C et 400°C dans la formulation de mortiers en substitution partielle au ciment neuve.

Une étude expérimentale a été menée pour évaluer l'effet de cette approche sur les propriétés physiques et mécaniques du mortier, à l'état frais et durci. Les essais réalisés concernent:

- La maniabilité (à l'aide du maniabilimètre B),
- La résistance à la flexion et à la compression (à 3, 14 et 28 jours),
- L'absorption d'eau,
- Et le calcul de l'indice d'activité pouzzolanique.

Les résultats obtenus montrent que le traitement thermique du ciment expiré, en particulier à 200°C avec un taux de substitution de 15%, améliore évidemment les performances mécaniques du mortier par rapport un mortier témoin. Néanmoins, les résistances mécaniques des mortiers à la flexion et à la compression restent proche à celle du mortier témoins. Les mortiers substitués par un ciment expiré ont une évolution d'absorption d'eau similaire et proche à celle du mortier témoin.

L'étude conclut que cette méthode représente une solution durable et économique pour la réutilisation des ciments expirés dans des applications non structurelles, tout en contribuant à la réduction des déchets et à la durabilité environnementale du secteur de la construction.

Mot clé : Ciment expiré, Mortier, Absorption d'eau, Traitement thermique.

ABSTRACT

The construction sector, essential to economic and social development, faces major challenges in terms of sustainability, resource management and reducing its environmental impact, especially because of the high carbon emission associated with cement production.

Wasted expired cement, due to improper storage, leads to chemical transformations that deteriorate its properties, making it difficult to reuse. This phenomenon generates significant economic and environmental losses.

The aim of this research project is to investigate the possibility of incorporating 10%, 15%, 20% and 25% of this cement, heat-treated at 200°C and 400°C, into mortar formulations as a partial replacement for new cement.

An experimental study was carried out to assess the effect of this approach on the physical and mechanical properties of mortar, in the fresh and hardened states. The tests carried out concerned:

- Workability (using the B workability meter),
- Flexural and compressive strength (at 3, 14 and 28 days),
- Water absorption,
- Pozzolanic activity index.

The results obtained show that heat treatment of expired cement, in particular at 200°C with a substitution rate of 15%, obviously improves the mechanical performance of the mortar compared with a control mortar. Nevertheless, the mortars' flexural and compressive strengths remain close to those of the control mortar. Mortars substituted with expired cement have a similar water absorption trend to that of the control mortar.

The study concludes that this method represents a sustainable and cost-effective solution for the reuse of expired cements in non-structural applications, while contributing to waste reduction and the environmental sustainability of the construction sector.

Key word: Expired cement, Mortar, Water absorption, Heat treatment.

ملخص

يواجه قطاع التشييد، الذي يعد ضرورياً للتنمية الاقتصادية والاجتماعية، تحديات كبيرة فيما يتعلق بالاستدامة وإدارة الموارد والحد من الأثر البيئي، لأسباب ليس أقلها ارتفاع انبعاثات الكربون المرتبطة بإنتاج الأسمنت.

ويؤدي إهدار الأسمنت منتهي الصلاحية، بسبب سوء التخزين، إلى تحولات كيميائية تؤدي إلى تدهور خواصه، مما يجعل من الصعب إعادة استخدامه. وهذا يؤدي إلى خسائر اقتصادية وبيئية كبيرة.

الهدف من هذا البحث هو دراسة إمكانية دمج نسب 10% و 15% و 20% و 25% من هذا الأسمنت المعالج حرارياً عند درجة حرارة 200 درجة مئوية و 400 درجة مئوية في تركيبات الملاط كبديل جزئي للأسمنت الجديد.

أجريت دراسة تجريبية لتقييم تأثير هذا النهج على الخواص الفيزيائية والميكانيكية للملاط، في الحالة الطازجة والصلبة. تتعلق الاختبارات التي أجريت بما يلي:

- قابلية التشكيل (باستخدام مقياس قابلية التشكيل "ب")

- قوة الانثناء والضغط (في 3 و 14 و 28 يوماً)،

- امتصاص الماء،

- وحساب مؤشر النشاط البوزولاني.

تُظهر النتائج التي تم الحصول عليها أن المعالجة الحرارية للأسمنت منتهي الصلاحية، ولا سيما عند درجة حرارة 200 درجة مئوية مع معدل استبدال بنسبة 15%، تحسن بوضوح الأداء الميكانيكي للملاط مقارنة بالملاط الشاهد. ومع ذلك، تبقى قوة الانثناء والضغط في الملاط قريبة من قوة الملاط الشاهد. المونة المستبدلة بالأسمنت منتهي الصلاحية لها اتجاه امتصاص الماء مماثل للملاط الشاهد.

وتخلص الدراسة إلى أن هذه الطريقة تمثل حلاً مستداماً وفعالاً من حيث التكلفة لإعادة استخدام الأسمنت منتهي الصلاحية في التطبيقات غير الإنشائية، مع المساهمة في الحد من النفايات والاستدامة البيئية لقطاع البناء والتشييد.

الكلمة الرئيسية: اسمنت منتهي الصلاحية، ملاط، امتصاص الماء، المعالجة الحرارية.

Introduction générale

INTRODUCTION GENERALE

Le secteur de la construction, pilier fondamental du développement économique et social, fait face à de nombreux défis à l'ère actuelle, notamment en matière de durabilité, de gestion des ressources et de réduction de l'empreinte écologique. Parmi les matériaux les plus utilisés dans cette industrie figure le ciment, dont la production et l'utilisation massive soulèvent des préoccupations environnementales majeures en raison de sa forte consommation énergétique et de ses émissions significatives de CO₂.

Parallèlement à ces préoccupations, une autre problématique se pose : celle du gaspillage de ciment en raison de son dépassement de date de validité. En effet, le ciment dit "expiré", lorsqu'il est mal stocké ou conservé trop longtemps, subit des transformations physico-chimiques - telles que la carbonatation ou l'hydratation prématurée - qui altèrent ses propriétés hydrauliques, le rendant inapte pour les applications structurelles classiques. Ce phénomène génère non seulement un impact économique considérable pour les industriels et les chantiers, mais également un problème environnemental lié à la gestion de ces déchets minéraux.

Dans ce contexte, des solutions innovantes émergent pour revaloriser ces matériaux considérés comme non conformes. Parmi elles, le traitement thermique du ciment expiré se présente comme une alternative prometteuse. Cette technique consiste à traiter le ciment à une température de 200° à 400°C, dans le but de réactiver partiellement ses phases hydrauliques. Des études récentes ont montré qu'un tel traitement permettrait de restaurer une certaine capacité de prise et de durcissement, ouvrant ainsi la voie à la réutilisation du ciment expiré dans des applications à moindre exigence structurelle, comme les mortiers.

Le mortier, en tant que matériau de liaison largement utilisé dans les travaux de maçonnerie, d'enduisage et de remplissage, se révèle être un excellent support pour évaluer les effets de cette réactivation thermique. En effet, la sensibilité du mortier aux caractéristiques du liant permet de mesurer avec précision l'impact du traitement thermique sur les propriétés physiques, mécaniques et sur l'absorption capillaire.

Ainsi, ce travail de recherche vise à :

- Évaluer les effets du traitement thermique sur les caractéristiques d'un ciment expiré ;
- Étudier l'influence de ce ciment traité sur les propriétés d'un mortier classique ;
- Identifier la température optimale de traitement permettant une réutilisation efficace ;

Partie I :

REVUE

BIBLIOGRAPHIQUE

CHAPITRE 1 : LE CIMENT

Le ciment est un matériau relativement récent dans l'histoire des matériaux de construction, son usage remontant à un peu plus d'un siècle. L'invention du ciment Portland est attribuée à l'écossais Joseph Aspdin, qui obtint un brevet en 1824 pour un liant issu d'un mélange de chaux et d'argile. Il a appelé ce produit « ciment Portland » en raison de sa ressemblance avec le calcaire extrait dans la région de Portland. Ce ciment est considéré comme le précurseur des ciments modernes [1] [2].

Au XXe siècle, l'industrie du ciment connaît une expansion rapide, notamment après la seconde guerre mondiale, période marquée par une forte demande en logements et infrastructures. Cette croissance s'est accompagnée du déclin progressif de l'utilisation de la chaux, jugée obsolète, au profit des ciments artificiels, plus performants. [1].

L'évolution de cette industrie a été rendue possible grâce à l'introduction d'équipements innovants tels que les fours rotatifs et les broyeurs à boulets, qui ont permis d'améliorer considérablement les procédés de production. À titre d'exemple, alors qu'il fallait environ 40 heures pour produire une tonne de clinker en 1870, ce processus ne nécessite aujourd'hui que trois minutes. En Algérie, cette dynamique s'est traduite par une augmentation notable de la production nationale de ciment, comme le confirment les statistiques officielles [1] [3].

1. Définition :

Le ciment est défini comme un liant hydraulique, c'est-à-dire une substance minérale finement moulue qui, lorsqu'elle est mélangée à de l'eau, forme une pâte capable de prendre et de durcir par un processus d'hydratation. Ce durcissement ne dépend pas de l'air, ce qui permet au matériau de conserver sa résistance et sa stabilité même en milieu immergé. [4]

Conformément à la norme européenne EN 197-1, le ciment, lorsqu'il est utilisé en combinaison avec de l'eau et des granulats appropriés, permet la fabrication de mortiers ou de bétons présentant une bonne ouvrabilité. Après durcissement, ces matériaux doivent atteindre des résistances mécaniques spécifiques et assurer une stabilité dimensionnelle durable. Ces propriétés en font un matériau fondamental dans le domaine de la construction, aussi bien pour les ouvrages réalisés en usine que pour ceux mis en œuvre sur chantier [5].

2. Constituants du ciment:

Le ciment est un liant hydraulique constitué de composants anhydres, cristallins ou vitreux, issus principalement du broyage du clinker, auquel s'ajoutent divers ajouts minéraux. Ces ajouts comprennent notamment le laitier granulé de haut fourneau, les pouzzolanes naturelles ou calcinées, les cendres volantes, les schistes calcinés, les fumées de silice, ainsi que des calcaires finement moulus [6].

Afin de contrôler le temps de prise, on y incorpore également un régulateur tel que le gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) ou l'anhydrite (CaSO_4), qu'il soit d'origine naturelle ou artificielle. Ce régulateur retarde la réaction d'hydratation du clinker, ce qui permet une maniabilité suffisante du béton frais lors de sa mise en œuvre. [6]

3. Fabrication :

La fabrication du ciment repose principalement sur la production du clinker, obtenu par la cuisson d'un mélange calibré de calcaire (environ 80 %) et d'argile (environ 20 %). Ce processus industriel se divise en plusieurs étapes : [8]

a. Extraction et concassage :

Les matières premières sont extraites de carrières à ciel ouvert. Des tirs de mine facilitent le détachement de la roche, qui est ensuite acheminée vers des concasseurs pour être réduite en fragments de taille inférieure à 50 mm. [8]

b. Préparation du cru :

Le calcaire et l'argile sont finement broyés, homogénéisés et transformés en une matière appelée "cru". Ce mélange peut être préparé selon différentes méthodes :

➤ Voie sèche (la plus utilisée) :

La matière première est broyée à sec, homogénéisée par superposition de couches et stockée dans des silos. [8]

➤ Voie humide :

Les matériaux sont brassés dans l'eau pour former une pâte, ensuite broyée et homogénéisée

dans des bassins de stockage. [8]

➤ **Voies semi-sèche et semi-humide :**

Variantes moins fréquentes utilisant des granules ou pâtes à faible teneur en eau.

c. Cuisson ou clinkérisation :

Le cru est introduit dans un échangeur de chaleur à cyclones, où il est progressivement chauffé par des gaz chauds. La décarbonatation commence dès cette étape. Le cru entre ensuite dans un four rotatif incliné et en rotation continue, où la température atteint 1450 °C. Les réactions chimiques y conduisent à la formation du clinker par combinaison des oxydes de calcium, de silicium, d'aluminium et de fer. Ce processus a connu une évolution remarquable: alors qu'en 1870, la production d'une tonne de clinker nécessitait 40 heures, elle se réalise aujourd'hui en environ 3 minutes grâce aux innovations technologiques telles que les fours rotatifs modernes et les broyeurs performants. [7]

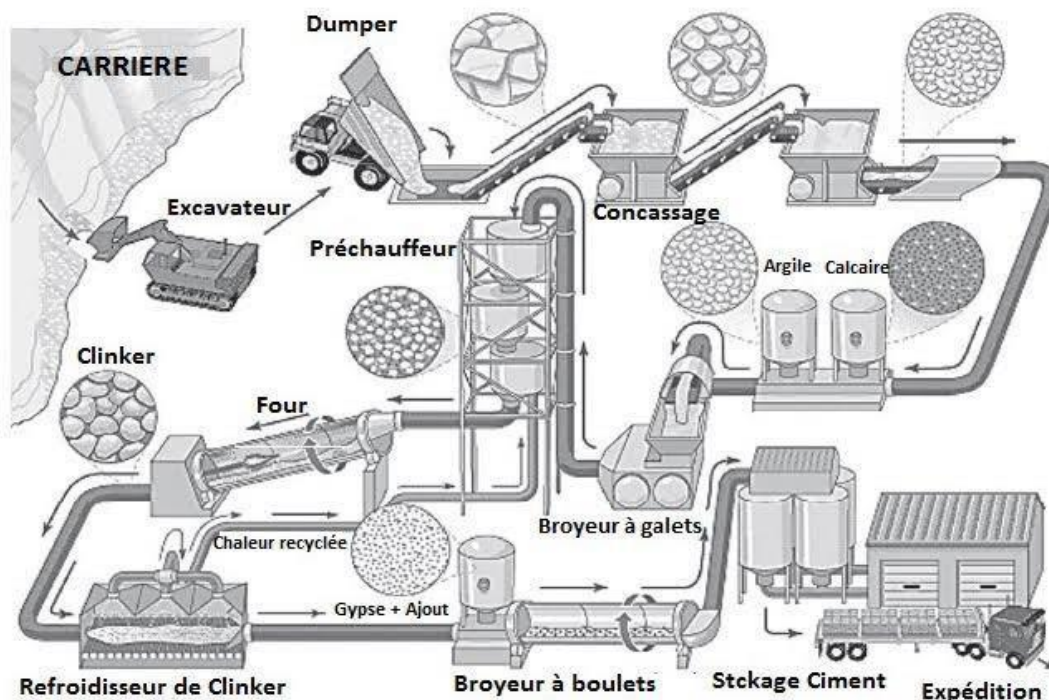


Figure 1 : Fabrication de ciment [8]

4. Les paliers de température pendant la clinkérisation :

Le processus thermique de cuisson dans un four rotatif se déroule selon des zones de température

successives, chacune jouant un rôle essentiel dans la transformation des matières premières : [9]

1. 100 °C – 200 °C : Évaporation de l'eau libre : [10]

- À ce stade initial, l'eau libre contenue dans la matière crue s'évapore.
- Ce processus est purement physique et n'implique pas de transformation chimique.
- Température critique pour assurer un séchage complet avant les réactions chimiques.

2. 200 °C – 400 °C : Déshydratation des argiles : [10]

• Les argiles (comme la kaolinite) commencent à perdre leur eau de constitution (déshydroxylation).

- Transformation des phases minérales : kaolinite → métakaolinite.
- Cette étape augmente la réactivité des composants.

3. 400 °C – 600 °C : Décomposition de carbonates mineurs : [10]

- Décomposition de certains carbonates secondaires (comme MgCO_3) → libération de CO_2 .
- Formation progressive de matériaux intermédiaires réactifs.
- Préparation des conditions chimiques nécessaires aux réactions solides-solides

4. 600 °C – 800 °C : Début de la décarbonatation du calcaire (CaCO_3) : [10]

- Réaction principale : $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$
- C'est la phase la plus importante en termes de perte de masse (~40 % du calcaire).
- Formation de chaux vive (CaO), nécessaire pour les réactions ultérieures.

5. 800 °C – 1000 °C : Réactions solides-solides : [10]

- Réactions entre CaO , SiO_2 , Al_2O_3 et Fe_2O_3 .
- Formation de phases intermédiaires : C_2S (bélite) commence à apparaître.
- Le matériau devient de plus en plus réactif.

6. 1000 °C – 1250 °C : Formation des silicates et aluminates : [10]

- Accélération des réactions de synthèse minéralogique.
- Formation de C_2S , C_3A (aluminat tricalcique) et C_4AF (ferrite).

- Le mélange devient partiellement fondu → début de phase liquide (~20 %).

7. 1250 °C – 1450 °C : Formation de l'alite (C₃S) : [10]

- Température maximale du four (~1450 °C) atteinte.
- Réaction principale : $C_2S + CaO \rightarrow C_3S$
- C₃S est le principal contributeur à la résistance mécanique du ciment à court terme.
- À ce stade, le cru est complètement transformé en clinker, constitué de nodules partiellement fondus.

Tableau 1 : Principaux paliers de température lors du processus de clinkérisation et transformations associées

Intervalle de Température (°C)	Étape principale	Transformation ou Réaction
100 – 200 °C	Séchage	Évaporation de l'eau libre
200 – 400 °C	Déshydratation des argiles	Kaolinite → Métakaolinite (perte d'eau de constitution)
400 – 600 °C	Décomposition mineure	Décomposition de MgCO ₃ , libération de CO ₂
600 – 800 °C	Décarbonatation du calcaire	$CaCO_3 \rightarrow CaO + CO_2$
800 – 1000 °C	Réactions solides-solides	Formation de C ₂ S (bélite), réactions entre CaO et SiO ₂ , Al ₂ O ₃ , Fe ₂ O ₃
1000 – 1250 °C	Formation de phases réactives	C ₂ S, C ₃ A, C ₄ AF → phase liquide commence à apparaître
1250 – 1450 °C	Clinkérisation complète	Formation de C ₃ S (alite) à partir de C ₂ S + CaO → clinker final

La trompe à 100°C est essentiel pour stabiliser les phases minérales (surtout C₃S) [1].

5. Types de ciments :

De leurs proportions. Celles-ci sont rapportées au noyau du ciment, c'est-à-dire à l'ensemble formé par le clinker, les constituants autres que le clinker et les constituants

secondaires, à l'exclusion des sulfates de calcium et les additifs. On a par convention [1]:

$$(\text{Clinker}) + (\text{autres constituants}) + (\text{constituants secondaires}) = 100\%$$

Les principales catégories de ciment sont : [11]

➤ Ciment Portland, noté CEM I, composé de 95 à 100 % de clinker;

➤ Ciment Portland composé : on distingue deux types :

CEM II/A-M composé de 80 à 94 % de clinker et de 6 à 20 % d'ajouts CEM II/B-M composé de 65 à 79 % de clinker et de 21 à 35 % d'ajouts

➤ Ciment de haut fourneau : on distingue trois types :

CEM III/A composé de 35 à 64 % de clinker et 36 à 65 % de laitier CEM III/B composé de 20 à 34 % de clinker et de 66 à 80 % de laitier CEM III/C composé de 5 à 19 % de clinker et de 81 à 95 % de laitier;

➤ Ciment pouzzolanique : on distingue deux types :

CEM IV/A composé de 65 à 89 % de clinker et 11 à 35 % d'un mélange de pouzzolane, de cendres volantes et de fumée de silice

CEM IV/B qui est composé de 45 à 64 % de clinker et de 36 à 55 % de même mélange ;

➤ Ciment composé : on distingue deux types :

CEM V/A qui est composé de 40 à 64 % de clinker, 18 à 30 % de laitier et 18 à 30 % de pouzzolane et cendres volante siliceuse

CEM V/B qui est composé de 20 à 38 % de clinker, 31 à 50 % de laitier et 31 à 50 % de pouzzolane et cendres volante siliceuse.

CHAPITRE 2 : CIMENT EXPIRE

Le ciment est un matériau sensible à l'humidité atmosphérique. Lorsqu'il est stocké pendant une longue période dans des conditions inappropriées (humidité, air libre...), il subit une hydratation partielle spontanée, même sans ajout d'eau, ce qui entraîne la formation de grumeaux et la perte progressive de sa réactivité [12].

Le ciment expiré désigne un liant hydraulique dont la durée de conservation, généralement fixée entre 3 à 6 mois dans des conditions optimales de stockage, a été dépassée. Au-delà de cette période, le ciment est susceptible d'avoir subi une hydratation partielle due à l'humidité de l'air, ce qui altère sa réactivité, sa capacité de prise et ses performances mécaniques initiales. Bien qu'il soit considéré comme non conforme aux normes d'usage courant, ce matériau conserve un certain potentiel latent. Ainsi, lorsqu'il est soumis à un traitement approprié, notamment thermique, il peut retrouver une partie de ses propriétés fonctionnelles. De plus, la valorisation du ciment expiré s'inscrit dans une logique de développement durable, en permettant la réduction des déchets industriels et la limitation des pertes économiques liées à son élimination [12].

1. Mesures de conservation pour préserver la qualité du ciment :

Afin de préserver ses caractéristiques physico-chimiques, le ciment doit être entreposé dans un environnement sec, protégé de l'humidité ambiante et placé sur une surface propre qui empêche tout contact direct avec le sol. L'usage de palettes en bois ou en plastique est fortement recommandé pour limiter le risque de contamination par l'humidité [13].

Plusieurs mesures de stockage permettent de prolonger la durée de vie du ciment :

- Un empilement soigneusement organisé des sacs, en limitant leur hauteur, afin d'éviter l'écrasement des couches inférieures.
- Le recours systématique aux palettes pour surélever les sacs et les isoler du sol.
- L'éloignement des murs susceptibles d'être humides, pour éviter toute absorption d'eau par capillarité.

2. Signes de dégradation du ciment et précautions à observer :

La proportion de clinker, un constituant du ciment, et d'autres additifs dans la composition

du ciment déterminent la qualité et la durée de vie du ciment. En général, un ciment correctement conditionné peut avoir une longévité de plusieurs mois voire un an. Avec le temps, le ciment perd de ses propriétés adhésives en raison de l'humidité qui peut pénétrer dans le sac ou de mauvais stockage [13].

La vérification de la durée de conservation mentionnée sur l'emballage, l'inspection des conditions de stockage (sec et à l'abri de l'humidité), l'analyse de la consistance sont des actes essentiels pour éviter les mauvaises surprises dans vos projets de construction. La présence de grumeaux ou de blocs de ciment durs, la texture friable ou effritée, les difficultés à manipuler le ciment (il ne coule pas comme une poudre fluide), et une mauvaise consistance du ciment sont des signes pour détecter si le ciment périmé [13].

Tableau 2 : Propriétés d'un ciment expiré

Propriété	Ciment en bon état	Ciment périmé
Consistance	Poudre fluide et homogène	Grumeaux ou blocs durs
Couleur	Uniforme, gris clair	Gris foncé ou présence de taches
Réaction avec l'eau	Pâte homogène	Mélange sableux ou effrité

3. Impact de l'utilisation de ciment expiré sur les performances mécaniques des matériaux :

L'emploi de ciment dont la date de péremption est dépassée présente des risques notables pour la qualité des ouvrages. Ce type de ciment perd une partie de son pouvoir liant, ce qui se traduit par une diminution de la résistance mécanique et de l'adhérence du mortier ou du béton. En conséquence, la stabilité et la durabilité des structures construites peuvent être gravement compromises, augmentant le risque de fissurations prématurées, voire d'effondrement, et menant potentiellement à des effondrements ou à des réparations coûteuses [13].

En Algérie, la problématique du ciment expiré a pris une ampleur notable, notamment dans un contexte de crise économique et de ralentissement du secteur du bâtiment. Un incident marquant a eu lieu dans la région d'Oran, où la Direction du contrôle de la concurrence et des prix (DCP) a procédé à la saisie de près de 9 000 tonnes de ciment expiré destinées à la commercialisation [14].

Les premières investigations ont révélé que ces quantités avaient été sorties de la zone sous douane sans respect des réglementations en vigueur. Suite à cette infraction, une saisie conservatoire a été ordonnée sur l'ensemble des lots concernés, et des vérifications ont été menées sur plusieurs chantiers afin d'identifier la provenance exacte du ciment utilisé [14].

Le Centre de Contrôle Technique de la Construction (CTC) a également été mobilisé pour effectuer des analyses sur les matériaux présents sur les sites suspects. Cette affaire a mis en lumière l'existence de pratiques illégales concernant la distribution de matériaux de construction expirés, et a soulevé de nombreuses interrogations quant à la qualité des constructions réalisées avec ce type de produit [14].

Une étude expérimentale sur l'élaboration d'un mortier à base d'un ciment expiré en 2024, qui se concentre sur l'intégration des proportions de 5 %, 10 %, 15 %, 20 % et 25 % de ciment expiré dans des mortiers. Les résultats montrent qu'un certain pourcentage de ciment expiré peut être substitué dans le mélange de mortier sans compromettre les caractéristiques mécaniques et l'ouvrabilité. La recherche apporte une contribution significative à la valorisation des déchets de ciment, offrant ainsi une solution écologique et économique pour l'industrie de la construction. Les mortiers formulés avec du ciment expiré présentent une maniabilité comparable à celle du mortier témoin, avec des temps d'écoulement similaires et des masses volumiques proches. Une légère augmentation de la masse volumique est observée pour le mortier contenant 20 % de ciment expiré. En ce qui concerne les performances mécaniques, toutes les résistances évoluent de manière similaire à celle du mortier témoin. Les résistances à la traction par flexion augmentent régulièrement avec le temps. Toutefois, le mortier à 5 % de ciment expiré se distingue par une baisse de la résistance à la compression à 28 jours, malgré de bonnes performances à jeune âge. Inversement, le mortier à 20 % de ciment expiré, bien que moins performant initialement, montre une amélioration notable de la résistance à la compression après 14 jours, dépassant celle du mortier témoin [12].

Une étude brésilienne récente s'est intéressée à l'influence de l'âge du ciment sur les propriétés mécaniques et la maniabilité du béton. L'objectif principal était d'évaluer l'ouvrabilité du béton à l'état frais ainsi que sa résistance à la compression en utilisant du ciment Portland ayant dépassé la limite de 90 jours définie par la norme brésilienne NBR [15].

Pour cela, trois types de ciment ont été sélectionnés, avec des dates de fabrication différentes: novembre 2018, juillet 2019 et août 2020. Les essais ont été réalisés sur des bétons formulés pour atteindre une résistance de 25 MPa à 28 jours. Des tests d'affaissement ont permis de mesurer l'ouvrabilité, tandis que la résistance à la compression a été évaluée aux âges de 1, 7, 8 et 10 jours [15].

Les résultats ont montré une variabilité importante en termes de maniabilité. Le béton réalisé avec du ciment de 2019 a présenté un affaissement plus faible que celui attendu pour un béton standard, malgré un rapport eau/ciment constant. Par ailleurs, la résistance à la compression a diminué de manière significative avec l'utilisation de ciment expiré, confirmant ainsi une altération de la performance mécanique [15].

Ces constats soulignent l'impact négatif potentiel de l'utilisation de ciment au-delà de sa date de validité, même en respectant les proportions habituelles de formulation du béton.

Plusieurs travaux de recherche ont mis en évidence le potentiel de réutilisation du ciment au-delà de sa date de péremption. Sathawane et al [16] ont analysé les modifications physico-chimiques induites par le vieillissement du ciment, démontrant qu'il conserve une certaine activité hydraulique résiduelle, bien que significativement réduite. De son côté, Neville [17] souligne que des phénomènes tels que la carbonatation et l'humidité accélèrent la dégradation des propriétés du ciment avec le temps.

4. Conclusion :

L'industrie cimentière moderne offre une large gamme de ciments aux propriétés spécifiques, conçus pour répondre à des usages variés en construction et en génie civil. Chaque type de ciment présente une composition chimique, une résistance mécanique et un comportement à l'hydratation qui lui sont propres, adaptés à des conditions précises d'emploi sur chantier ou en préfabrication.

Cependant, la durabilité de ces matériaux est fortement conditionnée par les conditions de stockage et le temps écoulé depuis leur fabrication. Lorsque le ciment dépasse sa période de validité, ses performances peuvent être altérées en raison de phénomènes comme la pré hydratation, la perte de réactivité ou l'agglomération des particules. Cela soulève un véritable enjeu technique, économique et environnemental, notamment dans les contextes où d'importantes quantités de

ciment sont mises de côté ou saisies comme déchets industriels.

À travers les études analysées et les expérimentations existantes, il apparaît que le ciment expiré, bien que dégradé, peut être partiellement réactivé ou valorisé par des méthodes spécifiques, telles que le traitement thermique, ou encore par le mélange avec des ajouts minéraux (fumée de silice, laitier, etc.). Ces approches permettent non seulement de limiter les pertes économiques, mais aussi de contribuer à une démarche plus durable dans le secteur de la construction, en réduisant l’empreinte environnementale de la production cimentière.

Ainsi, la réutilisation du ciment expiré, lorsqu’elle est encadrée par des tests rigoureux et des méthodes de traitement appropriées, représente une alternative prometteuse à l’élimination systématique, et ouvre des perspectives intéressantes pour la formulation de nouveaux types de mortiers à performance contrôlée.

Axes de recherche et problématique

AXES DE RECHERCHE ET PROBLEMATIQUE

La construction durable est aujourd'hui confrontée à un double défi : réduire son empreinte environnementale tout en maintenant des performances techniques et économiques satisfaisantes. Dans ce contexte, le recyclage des matériaux de construction, notamment des liants hydrauliques, représente une piste prometteuse. Parmi ces matériaux, le ciment expiré, souvent considéré comme un déchet, pourrait être réutilisé sous certaines conditions pour limiter le gaspillage des ressources.

Cependant, la perte partielle de ses propriétés hydrauliques avec le temps limite son utilisation directe dans les mortiers. Pour pallier ce problème, ce travail explore une méthode de traitement thermique (200°C et 400°C pendant 2 heures) visant à réactiver partiellement le ciment expiré et à évaluer son impact sur les propriétés mécaniques et physiques des mortiers.

L'objectif principal de cette étude est donc :

- D'élaborer des mortiers incorporant du ciment expiré traité thermiquement à différentes proportions (10%, 15%, 20%, 25%).
- D'analyser l'influence du traitement thermique sur l'ouvrabilité, la résistance en flexion-compression et l'absorption d'eau des mortiers.
- De déterminer le taux optimal de substitution permettant de concilier performance mécanique.
- Cette recherche s'inscrit dans une démarche expérimentale rigoureuse combinant essais normalisés, afin d'apporter des réponses concrètes aux enjeux du recyclage des ciments dans le BTP.

Partie II :

**Matériaux et Méthodes
expérimentales**

Chapitre 1 :

Matériaux et méthode de formulation

1. Introduction

Le mortier est un matériau de construction usuel, qui s'apparente à une pierre artificielle. Il est un mélange de sable, un liant hydraulique qui assure la cohésion entre les différents grains du squelette, tel que le ciment, et de l'eau.

- Eventuellement, et en faible quantité, des produits d'addition, les adjuvants, influençant certaines propriétés ou comportements du mortier.

L'intérêt du matériau de mortier réside dans sa facilité de mise en œuvre puisqu'il se présente à l'état pâteux et qu'il suffit de remplir des moules de la forme de l'élément à réaliser.

Les différents essais pour la détermination des caractéristiques physico-chimiques et minéralogiques des matériaux ont été effectués dans des laboratoires spécialisés suivants :

- Laboratoire du Département de Génie Civil-FST de l'Université de Mostaganem.
- Laboratoire de recherche LCTPE de l'Université de Mostaganem.

2. Matériaux utilisés

a) Le ciment

Le ciment utilisé est un ciment gris pour béton de haute performance, destiné à la construction des ouvrages d'art. C'est un ciment composé CPJ-CEM II/B 42.5 N nommé « Matine » en provenance de la cimenterie LAFARGE, dont les caractéristiques physiques et analyse chimique moyenne de ce ciment sont données respectivement dans les tableaux (1-2-3) suivants :

Tableau 1 : Caractéristique effectué dans le laboratoire.

Caractéristiques	Résultats
Masse volumique absolue	2.9 g/cm ³
Masse volumique apparente	1.04 g/cm ³
Consistance	26.5%
Début de prise	2h 38min
Fin de prise	3h 50 min
Temps de prise	1h 12 min

Tableau 2: Analyse chimique selon la fiche technique.

Caractéristiques	Valeur
Perte au feu (%) (NA 5042)	9
Teneur en sulfates (SO ₃) (%)	2.5
Teneur en oxyde de magnésium MgO (%)	1.7
Teneur en chlorures (NA5042) (%)	0.04
C3S (%)	60
C3A (%)	7.5



Tableau 3 : Propriétés physiques selon la fiche technique.

Caractéristiques	Valeur
Consistance Normale (%)	26.5
Finesse suivant la méthode de Blaine (cm ² /g) (NA231)	4200
Retrait à 28 jours (µm/m)	950
Expansion (mm)	2.9
Début de prise (min)	150
Fin de prise (min)	230
2 jours (MPa)	11
28 jours (MPa)	44

b) Granulats

Les granulats utilisés sont un sable de carrière issus de la carrière de MASCARA et un sable de mer qui provient de la carrière de SIDI LAKHDER.

Tableau 4 : Aperçu visuel des sables.

Désignation	Sable de mer	Sable de carrière
Apparence		
Nature	Siliceux d/D=0/3	Calcaire d/D=0/3

Dans notre composition du mortier on a utilisé des granulats bien lavés. En vue de leur utilisation dans la confection du mortier, les essais des granulats ont été réalisés au sein de laboratoire MDS/MDC au sein de notre université. Les résultats son introduit au tableau 5 suivant.

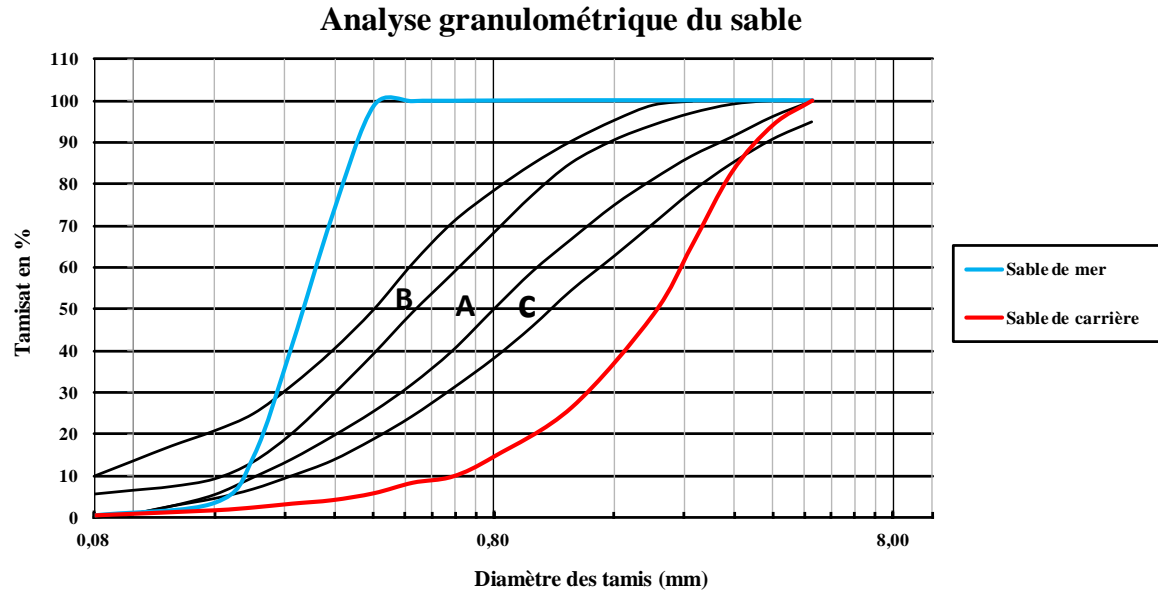
Tableau 5 : Les caractéristiques physiques des granulats lavés obtenues par l'étude expérimentale.

Caractéristiques	Sable de mer SM	Sable de carrière SC
Masse volumique absolue (g/cm ³)	2.63	2.5
Masse volumique apparente (g/cm ³)	1.5	1.43
Equivalent de sable	95.9%	95.47%
Module de finesse	1.2	3.6
Pourcentage des fines (%)	0,01	0.01
Absorption (%)	0.64%	1.82%

La valeur de la masse volumique de sable de mer est celle d'un sable siliceux.

La valeur d'équivalent de sable dépasse 90%, significatif d'un sable très propre, ceci a été constaté lors de lavage de ce sable pour la récupération des fines.

Les courbes granulométriques des granulats sont représentées dans la figure 1 suivant :



Nous remarquons que la courbe de sable de carrière n'appartient pas au fuseau privilégié, pour cette raison on a effectué des corrections par le sable de mer et les fillers calcaires en utilisant la méthode de module de finesse comme suit :

En utilisant la règle d'Abrams, on a utilisé un SC de module de finesse important $M_{f1}=3.2$ et $M_{f2}=1.2$ pour un SM fin, afin d'obtenir un mélange dont le module de finesse serait $M_f=2.7$. Les proportions des deux sables sont les suivantes :

$$SC = \frac{(M_f - M_{f2})}{(M_{f1} - M_{f2})} = \frac{(2,7 - 1,2)}{(3,2 - 1,2)} = 0,75 = 75\%$$

$$SM = \frac{(M_{f1} - M_f)}{(M_{f1} - M_{f2})} = \frac{(3,2 - 2,7)}{(3,2 - 1,2)} = 0,25 = 25\%$$

Selon la norme Française [NF EN 206-1], notre sable contient une quantité de 8% des fillers calcaire, et on a trouvé un sable de $M_f= 2,38$.

La Figure 2 représente l'analyse granulométrique des sables (avant et après correction).

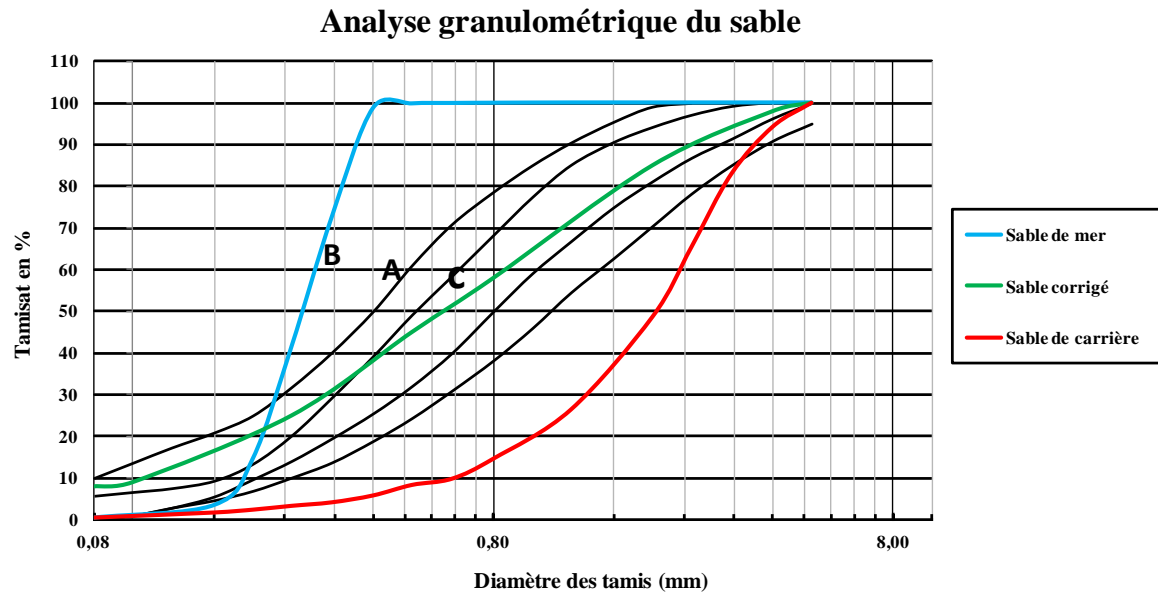


Figure 2: L'analyse des sables non corrigés et sable corrigé.

c) Fillers calcaires

Les fillers utilisés composés d'éléments fins passant à un tamis de mailles 80 μm sont de nature calcaire provenant de la carrière de Kristel.

On a lavé un sable de carrière passant au tamis de 80 μm , puis on a séché les fillers obtenues dans une étuve et on les a broyés.

d) Substitution

Un ciment composé expiré CPJ-CEM II/B 42.5 N nommé « Matine » en provenance de la cimenterie LAFARGE. Ce ciment a été stocké avant l'an 2021 dans le laboratoire LCTPE. Ce ciment a été tamisé à 80 μm pour avoir une finesse proche d'un ciment neuve, après traité à 200°C et à 400°C pendant 2h.



Figure 3: préparation de ciment expiré

Les caractéristiques physiques ainsi que l'analyse chimique moyenne de ce ciment sont présentées aux tableaux (Tableau 6, Tableau 7, Tableau 8) :

Tableau 6: Caractéristique d'identification effectué dans le laboratoire.

Caractéristiques	Résultats
Masse volumique absolue	2,9 g/cm ³
Masse volumique apparente	1.15 g/cm ³
Consistance	20.5%

Tableau 7: Analyse chimique selon la fiche technique.

Caractéristiques	Valeur
Perte au feu (%) (NA 5042)	0,5 à 3
Teneur en sulfates (SO ₃) (%)	1,8 à 3
Teneur en oxyde de magnésium MgO (%)	1,2 à 3
Teneur en chlorures (NA5042) (%)	<0,1
C3A (%)	<3,0

Tableau 8: Propriétés physiques selon la fiche technique.

Caractéristiques	Valeur
Consistance Normale (%)	25 à 28
Finesse suivant la méthode de Blaine (cm ² /g) (NA231)	3200 à 3800
Retrait à 28 jours (µm/m)	<1000
Expansion (mm)	≤ 2.0
Chaleur d'hydratation	<270 j/g
Début de prise (min)	>60
Fin de prise (min)	240 à 400
Résistance à la compression 2 jours (MPa)	≥10
Résistance à la compression 28 jours (MPa)	≥42,5

e) Eau de gâchage:

Eau de gâchage est l'eau nécessaire à l'hydratation du ciment, elle facilite aussi la mise en œuvre du béton ou du mortier. Un excès d'eau diminue les résistances et la durabilité du béton.

L'eau doit être propre et ne pas contenir d'impuretés nuisibles (matières organiques, alcalis). L'eau potable convient toujours. Le gâchage à l'eau de mer est à éviter, surtout pour le béton armé. Les caractéristiques des eaux requises pour la confection des mortiers et des bétons sont précisées dans la norme NF P 18-303.

3. Formulations adoptés des mortiers

a) Mortiers normal (témoin)

Le mortier normal est un mortier qui sert à définir certaines caractéristiques des ciments et notamment la résistance à la compression. Ce mortier est réalisé conformément à la norme EN 196-1.

Le principe d'essai consiste à préparer un mortier normal à l'aide d'un sable corrigé obtenue par un mélange de 75% sable concassé et 25% de sable mer. La courbe granulométrique du mélange de sable se situe à l'intérieur du fuseau granulaire de sable (plage préférentiel).

Pour obtenir un mortier normalisé témoin on doit :

- Mélanger le sable avec le ciment CPJ-CEM II/B - 42,5 N et de l'eau dans les proportions suivantes : **450 ± 2 g de ciment, 1350 ± 5 g de sable** et **225 ± 1 g d'eau (E/C=0,5)**.

b) Mortiers avec ajout (ciment expiré) :

Pour étudier l'effet de traitement thermique sur les ciments expirés, on a besoin de préparé des mélanges du mortier avec quatre (4) proportions de substitution en ciment expiré CPJ-CEM II/B 42,5 N traité à 200°C et à 400°C pendant 2h à des pourcentages de 10%, 15%, 20% et 25% en masse.

Les tableaux ci-dessous représentent les différentes compositions du mortier.

Tableau 9: La composition des mortiers

Les masses en gramme (g)						
Taux d'ajout		0%	10%	15%	20%	25%
Ciment Matine		450	405	382,5	360	337,5
Ciment Matine Expiré		0	45	67,5	90	112,5
Eau		225	225	225	225	225
Sable 1350 g	Sable concassé	1012,5	1012,5	1012,5	1012,5	1012,5
	Sable de mer	337,5	337,5	337,5	337,5	337,5

4. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons identifié tous les matériaux entrant dans la composition des mortiers. Puis nous avons déterminé les compositions de chaque type de mortier.

Chapitre 2 :

Méthodes expérimentales

1. Introduction

Dans ce chapitre, on va décrire les essais expérimentaux réalisés au cours de notre étude. Ces essais sont relatifs à l'étude des propriétés des matériaux utilisés et des mortiers confectionnés. En débutant par des essais sur les sables, sur le ciment et en terminant par des essais de caractérisation de mortier à l'état frais et durci. Les modes opératoires des essais expérimentaux cités dans ce chapitre s'appuient sur des textes normatifs.

2. Essais de caractérisations physiques des matériaux

a) Analyse granulométrique (EN 933-1 et EN 933-2)

La granulométrie est la recherche de la distribution en poids des particules solides d'un sol suivant leurs dimensions.

Les résultats de l'analyse granulométrique facilitent l'identification du matériau et permet de prévoir certaines propriétés de perméabilité, aptitude au compactage.

L'analyse granulométrique permet de déterminer la grosseur et les pourcentages pondéraux respectifs des différentes familles de grains constituant l'échantillon.

L'essai consiste à classer les différents grains constituant l'échantillon en utilisant une série de tamis (figure 1), dont les dimensions des ouvertures sont décroissantes du haut vers le bas. Le matériau étudié est placé en partie supérieure des tamis et le classement des grains s'obtient par vibration de la colonne de tamis.



Figure 1: La série de tamis.

Le résultat de la granulométrie est traduit dans une courbe dont l'ordonnée y représente le pourcentage de tamisâtes passants, et l'abscisse x représente les ouvertures de tamis.

b) Module de finesse (NF P18-304)

Le module de finesse est un nombre compris entre 1.8 et 3.3 qui caractérise la finesse des granulats du matériau. Il est proportionnel à la surface située au-dessus de la courbe granulométrique du matériau.

Le module de finesse est défini selon la norme française [NFP 18-540] par le 1/100 de la somme des refus cumulés exprimés en pourcentages sur les différents tamis de la série suivante : 0.16 ; 0.315 ; 0.63 ; 1.25 ; 2.5 ; 5.

Le module de finesse sert à évaluer la grosseur du sable. Lorsque MF est comprise entre :

- 1.8 et 2.2 : le sable est à majorité de grains fins,
- 2.2 et 2.8 : on est en présence d'un sable préférentiel,
- 2.8 et 3.3 : le sable est un peu grossier.

c) Equivalent de sable (NF P18-598)

L'essai d'équivalent de sable, permettant de mesurer la propreté d'un sable, est effectué sur la fraction d'un granulat passant au tamis à mailles carrées de 5mm. Il rend compte globalement de la quantité et de la qualité des éléments fins, en exprimant un rapport conventionnel volumétrique entre les éléments sableux qui sédimentent et les éléments fins qui flocculent (figure II-2).

La valeur de l'équivalent de sable (ES) est le rapport, multiplié par 100, de la hauteur de la partie sableuse sédimentée, à la hauteur totale du flocculat et de la partie sableuse sédimentée.

L'essai consiste à verser un échantillon de sable et une petite quantité de solution lavante dans un cylindre gradué et d'agiter de façon à détacher les revêtements argileux des particules de sable de l'échantillon. On complète alors le sable en utilisant le reste de solution lavante afin de faire remonter les particules fines en suspension au-dessus du sable. Après 20 min, les hauteurs des produits sont mesurées. L'équivalent de sable est le rapport hauteur du sable sur hauteur totale, exprimé en pourcentage.

Le but de cet essai est de permettre de mesurer rapidement l'importance relative des éléments fins au sien d'un matériau sableux, il rend compte globalement de la qualité et la quantité des éléments fins qui flocculent et l'élément sableux qui sédimentent.

On a rempli l'éprouvette jusqu' au premier repère avec la solution lavante, puis on a introduit l'échantillon avec l'entonnoir donné des petits coups sous l'éprouvette afin de déloger des bulles d'air et laisser imbiber pendant 10min. On ferme l'éprouvette et on secoue (90cycle d'aller et retour de 20cm de course dans le sens horizontal en 30 s) avec l'agitation manuelle. On a ôté le bouchon rincé au-dessus avec la solution lavante. On a introduit ensuite le tube de laveur au fond de l'éprouvette et on a lavé pour la suspension des éléments argileux et attendre pendant 20min. On a mesuré à l'aide du régle la hauteur h_1 du niveau supérieur du floculat par rapport au fond de l'éprouvette puis la hauteur h_2 du niveau supérieur de la partie sédimentée par rapport au fond de l'éprouvette.

Puis on a appliqué la formule $ES = \frac{h_2}{h_1} * 100$



Figure 2 : Essai d'équivalent de sable.

d) La masse volumique apparente

La masse volumique apparente d'un matériau est la masse volumique d'un mètre cube du matériau pris en tas, comprenant à la fois des vides perméables et imperméables de la particule ainsi que les vides entre particules.

Cela implique la détermination par pesée de la masse totale M et du volume total V .

On a rempli un récipient dont on connaît le volume $V = 1L$ en granulat (Sable de mer et sable de carrière) avec une hauteur de 10cm entre la main et le récipient cylindre, en prenant de grandes précautions pour éviter les phénomènes parasites provoqués par le tassement. On racle le granulat avec une règle. On pèse ensuite l'échantillon en prenant soin de déduire la masse du récipient. La masse de l'échantillon est divisée par le volume du récipient pour donner la masse volumique apparente du matériau (figure II-3).

Soit : M_1 : la masse du cylindre vide M_2 : la masse du cylindre plein

V_T : le volume total intérieur du cylindre ($V = 1L$)

La masse volumique : $MV = (M2 - M1)/VT$;



Figure 3 : La masse volumique apparente du ciment.

e) La masse volumique absolue des sables

La masse volumique absolue ρ_s est la masse par unité de volume de la matière qui constitue le granulat, sans tenir compte des vides pouvant exister dans ou entre les grains. Il ne faut pas confondre ρ_s avec la masse volumique ρ qui est la masse de matériau par unité de volume, celui-ci intégrant à la fois les grains et les vides. Les masses volumiques s'expriment en t/m^3 , ou en g/cm^3 .

Elle est déterminée ; pour les granulats (Sable de mer et sable de carrière); à l'aide d'une éprouvette graduée (figure II-4). On a rempli l'éprouvette en eau jusqu'au repère destiné $V1$. On a pesé une masse de granulat M puis on la versé dans l'éprouvette. On prend le nouveau volume (volume d'eau + granulat) $V2$. On calcule la masse volumique par la loi $\rho_s = M/(V2 - V1)$.



sable de carrière



Sable de mer

Figure 4: Les masses volumiques absolues à l'aide d'une éprouvette graduée

Remarque : La masse volumique absolue du ciment a été déterminée selon la norme [NF P 18-555], par le pycnomètre de Le Chatelier et le benzène.

f) Pourcentage des fines (NF P 18 301)

Nous avons mis un échantillon déshydraté complètement dans un récipient et on la pèse. Puis nous avons la versé dans un tamis de 80 µm et on a lavé sous l'eau jusqu'à obtenir une propreté parfaite, on a séché l'échantillon, puis on a la pesé à nouveau.

Le pourcentage d'impureté (fine) est calculé par :

$$\%fine = \frac{P1 - P2}{P2} * 100$$

Telle que :

P1= masse de granulat sec avant lavage

P2= masse de granulat sec après lavage

g) Absorption [NF P 18-554(gravillon) et NF P 18-555(sable)]

Certains matériaux granulaires peuvent présenter une porosité interne qui est préjudiciable à la résistance au gel des bétons. En effet l'eau incluse dans le granulat provoque l'éclatement du béton lorsque celui-ci est soumis de manière prolongée à des basses températures. On détermine un coefficient d'adsorption définie comme le rapport de l'augmentation de la masse (Ma) de l'échantillon après imbibition par l'eau pendant 24heures, à la masse sèche (Ms) après passage à l'étuve à 105° C de l'échantillon. Le coefficient d'absorption est calculé par la formule suivante :

$$Ab = \frac{Ma - Ms}{Ms} . 100$$

h) La masse volumique absolue de Ciment

La méthode utilisée pour mesurer la densité absolue des éléments fins inférieurs à 0,075 mm est la méthode du pycnomètre ou la méthode des trois poids.

La méthode concerne de :

- Peser un pycnomètre rempli jusqu'à la marque par un liquide non réactif avec le matériau de densité absolue connue (M1).
- Peser une quantité de matière fine (M2).

- Vider légèrement le pycnomètre et introduire le matériau à tester, puis remplir à nouveau le pycnomètre avec le liquide.
- Peser la combinaison du liquide et du matériau (M3).
- Calculer la masse de liquide remplacée par le matériau : $M=M1+M2-M3$
- Calculer le volume de liquide remplacé par le matériau : $V = \frac{M}{\rho_l}$
- Calculer la densité absolue du matériau : $\rho = \frac{M2}{V}$

Remarque :

Pour déterminer la densité absolue du ciment, il convient d'utiliser un liquide non réactif au ciment, par exemple le toluène (méthylbenzène) ou le naphta lourd (white spirit).

i) Consistance du ciment (NF EN 196-3)

La consistance normalisée de la pâte de ciment est déterminée à l'aide de l'appareil de Vicat muni d'une sonde.

En réglant un appareil de VICAT muni de la sonde par abaissement de celle-ci jusqu'à la plaque de base plane et par ajustement du repère au zéro de l'échelle, on relève la sonde en position d'attente.

On prépare la pâte de ciment, introduisant une quantité d'eau choisie ($E/C=0.26$) et une quantité de 500 g de ciment dans la cuve de malaxeur.

On malaxe comme introduit le tableau II-1 suivant :

Tableau 1 : Mode de malaxage de pâte de ciment.

Opérations	Introduction de l'eau	Introduction du ciment	Malaxage	Raclage de la cuve	Malaxage
Durée	5 < t < 10 sec		90 sec	15 sec	90 sec.
Etat du malaxeur	<i>Arrêt</i>		<i>Vitesse lente</i>	<i>Arrêt</i>	<i>Vitesse lente</i>

Après le malaxage, en introduisant rapidement la pâte dans le moule tronconique sans tassement excessif, le moule étant placé sur la plaque de base plane, puis on les place dans l'axe de la sonde de l'appareil de VICAT. On abaisse la sonde avec précaution jusqu'à ce qu'elle arrive au contact de la pâte. 30s après avoir lâché la sonde, on note la distance d entre l'extrémité de la sonde et la plaque de base plane. On renouvèle l'opération jusqu'à obtenir de $d=6 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$ ($d= 5\text{mm} ,6\text{mm} ,7\text{mm}$) (FigureII-5).



Figure 5: Consistance de ciment.

j) Temps de début et fin de prise (NF EN 193-3)

Le temps de prise est déterminé à l'aide de l'appareil de Vicat muni d'une aiguille.

On règle l'appareil de VICAT muni de l'aiguille par abaissement de celle-ci jusqu'à la plaque de base plane et par ajustement du repère au zéro de l'échelle. Puis on relève l'aiguille en position d'attente. On prépare la pâte de ciment comme pour l'essai de consistance en introduisant la quantité d'eaux déterminé pour la pâte de consistance normalisée. En introduisant rapidement la pâte dans le moule tronconique sans tassement excessif, le moule étant placé sur la plaque de base plane. On place le moule et la plaque de base dans l'axe de la sonde de l'appareil de VICAT. Puis on abaisse l'aiguille avec précaution jusqu'à ce qu'elle arrive au contact de la pâte. On l'ache l'aiguille sur la pâte et noter ce moment comme temps zéro. On note la distance d entre l'extrémité de l'aiguille et la plaque de base plane. On nettoie l'aiguille après chaque pénétration. On renouvèle la mesure de d tous les 5 min jusqu'à obtention de $d=4 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$. On note le temps du début de prise à partir du temps zéro.

En retournant le moule tronconique rempli sur la plaque de base plane et on place le moule inversé et la plaque de base plane dans l'axe de la sonde de l'appareil de VICAT. On abaisse l'aiguille avec précaution jusqu'à arrive au contact de la pâte. Puis on lâche l'aiguille sur la pâte. On renouvèle la mesure de d tous les 5 min jusqu'à obtention du $d=0.5 \text{ mm}$. On note le temps de fin de prise à partir du temps zéro.

Le temps de prise est égal à la déférence du temps entre le début et la fin de prise.

3. Préparation et confection des éprouvettes

Avant d'être utilisé pour l'identification de caractéristiques physique et/ou mécanique, ce mortier doit être malaxé pendant 4 minutes conformément aux prescriptions de la norme EN 196-1 :

Introduire l'eau en premier dans la cuve du malaxeur ; y verser ensuite le ciment ; aussitôt après, mettre le malaxeur en marche à vitesse lente. Après 30 s de malaxage introduire régulièrement le sable pendant les 30s suivantes. Mettre alors le malaxeur à sa vitesse rapide et continuer le malaxage pendant 30s supplémentaires.

Arrêter le malaxeur pendant 1 min 30 s. Pendant les 15 premières secondes enlever au moyen d'une raclette tout le mortier adhérent aux parois et au fond du récipient en le repoussant vers le milieu de celui-ci.

Reprendre ensuite le malaxage à grande vitesse pendant 60 s.
Ces opérations de malaxage sont récapitulées dans le **tableau 2**.

Tableau 2 : séquences de malaxage

Opération	Introduction de l'eau	Introduction de ciment		Introduction de sable		Raclage de la cuve		
Durée	/	/	30s	30s	30s	15s	1min 15s	60s
Statues de malaxeur	Stop		Vitesse lente		Vitesse rapide	Stop		Vitesse rapide

4. Essais de caractérisations physiques des mortiers

a) à l'état frais (La maniabilité)

La maniabilité du mortier frais est déterminée à l'aide d'appareil de maniabilimètre B, il consiste en un boîtier parallélépipédique métallique à des dimensions connus, posé sur des supports en caoutchouc, équipé d'un vibreur et muni d'une cloison amovible.



Figure 6 : Maniabilimètre B.

Dans ces essais la consistance est caractérisé par le temps que met le mortier pour s'écouler sous l'effet d'une vibration.

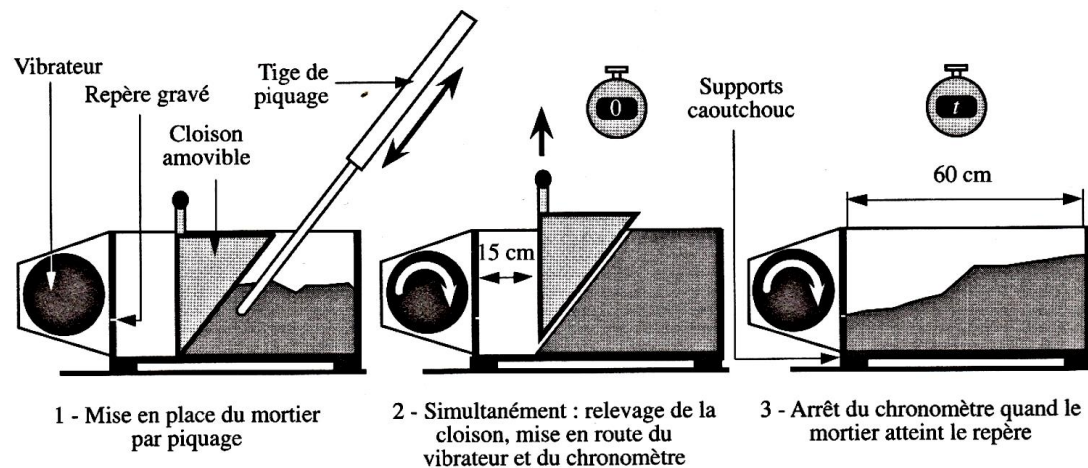


Figure 7 : Principe de fonctionnement du maniabilimètre B.

- Le mortier est introduit, à l'aide d'une truelle, dans la plus grande partie délimitée par la cloison et mis en place en 4 couches à peu près égales. Chaque couche étant soumise à 6 coups au moyen de la tige de piquage qui doit être tenue parallèlement à la paroi inclinée de la cloison amovible.

- 2 minutes et 30 secondes après la fin du malaxage, la cloison est retirée, provoquant la mise en route du vibrateur et le déclenchement d'un chronomètre par l'opérateur. Sous l'effet de la vibration le mortier s'écoule.

- Le chronomètre est arrêté quand le mortier atteint un trait repère sur la paroi opposée du boîtier. Le temps t mis par le mortier pour s'écouler caractérise sa consistance. Ce temps sera d'autant plus court que le mortier sera plus fluide (ou plus maniable, d'où le nom de l'appareil) comme illustré au tableau 3.

Tableau 3 : Classe de consistance selon la durée d'écoulement. [47]

Rang de maniabilité	Temps d'écoulement (secondes)	Caractéristiques
Très faible	> 40 s	Mortier très rigide, difficile à mettre en place, nécessite un compactage important
Faible	30 à 40 s	Mortier peu fluide, adapté à des applications avec vibration
Moyenne	20 à 30 s	Bon équilibre entre maniabilité et stabilité, utilisé couramment
Élevée	10 à 20 s	Mortier fluide, facile à couler et à répartir
Très élevée	< 10 s	Très fluide, auto-nivelant, utilisé dans des cas spécifiques (ex : réparations rapides)

5. Méthode de coulage des éprouvettes

Les moules utilisés pour la confection des éprouvettes sont des moules normalisés en acier de forme prismatique ($4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$).

- Le moulage des échantillons se fait immédiatement après la préparation du mortier.
- Introduire la première couche de mortier (environ 300g) dans chacun des compartiments du moule. Étendre la couche uniformément et compacter la première couche à l'aide de 60 coups.
- Introduire la deuxième couche de mortier, l'égaliser et la compacter à l'aide de 60 coups supplémentaires.
- Enlever l'excès de mortier à l'aide de la règle métallique, tenue presque verticalement et déplacée lentement, avec un mouvement de scie transversal. Lissez la surface des éprouvettes à l'aide de la même règle tenue presque à plat
- Après lissage, chaque moule a été couvert avec une feuille plastique pour éviter l'évaporation de l'eau et stocké dans l'ambiance du laboratoire.
- Le démoulage de toutes les éprouvettes a été effectué 24 h après le coulage.
- Les moules sont marqués pour identifier les spécimens.
- Les éprouvettes sont introduits dans un bain d'eau.



Figure 8 : Moule prismatique

Ces éprouvettes confectionnées sont pour des écrasements à :

- 3 jours.
- 7 jours.
- 14 jours.
- 28 jours.

6. Essais de caractérisations mécaniques des mortiers

a) Essai de traction par flexion par trois points

Il détermine la contrainte de traction par flexion σ_{tf} conduisant à l'écrasement d'une éprouvette de mortier. Il s'effectue sur les éprouvettes prismatiques ($4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$). Les

essais sont réalisés avec une vitesse de chargement de 0,5 MPa/s (figure II-14). Ils ont élaboré au laboratoire LCTPE de l'université de Mostaganem.

On place le prisme dans la machine d'essai avec une face latérale sur les rouleaux de support et avec son axe longitudinal normal aux supports. La distance entre les supports est de $100 \text{ mm} \pm 0,5 \text{ mm}$. Appliquer la charge verticalement au moyen du rouleau de chargement sur la face latérale opposée du prisme et l'augmenter progressivement à un taux de $50 \pm 10 \text{ N/s}$ jusqu'à la rupture.

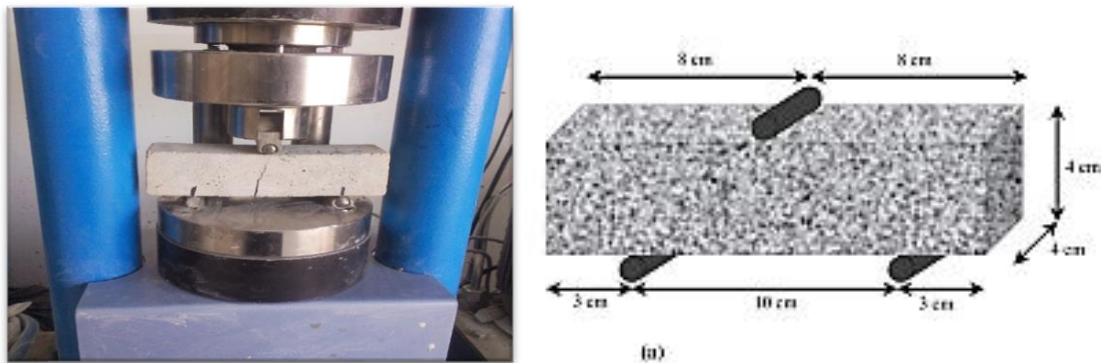


Figure 9 : Essai de traction par flexion.

Calcul de la résistance à la flexion selon l'essai des trois points

$$\sigma = 3FL / 2wd^2$$

F est la force maximale appliquée, **L** est la longueur de l'échantillon, **w** est la largeur de l'échantillon et **d** est la profondeur de l'échantillon.

b) Essai de compression

Il s'agit de déterminer la contrainte de compression σ_c conduisant à l'écrasement d'une éprouvette de mortier. Il s'effectue sur les deux parts des éprouvettes prismatiques ($4 \times 4 \times 16$) cm^3 qu'ils sont obtenue après la traction par flexion.

Les essais d'écrasements de compression ont été effectués au laboratoire LCTPE de la pathologie à l'université de Mostaganem.

Centrer latéralement les moitiés de prisme sur les plateaux auxiliaires en acier dur, qui déterminent exactement la zone de compression (parce que les moitiés de prisme ont une forme irrégulière). Selon la norme EN 196-1, les dimensions des plateaux sont de $40 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$ et leur épaisseur est d'au moins 10 mm . Pendant la charge, l'attitude relative des plateaux

supérieur et inférieur doit rester fixe. La résultante des forces doit passer par le centre de l'échantillon. Augmenter la charge en douceur au taux de $2\,400 \pm 200$ N/s pendant toute la durée de l'application de la charge jusqu'à la rupture.

Un résultat d'essai est défini comme la moyenne arithmétique des six déterminations de la résistance à la compression effectuées sur un ensemble de trois prismes.

Si un résultat parmi les six déterminations s'écarte de plus de $\pm 10\%$ de la moyenne des six déterminations, ce résultat est écarté et la moyenne des cinq résultats restants est calculée. Si un autre résultat de ces cinq déterminations s'écarte de plus de $\pm 10\%$ de leur moyenne, rejeter l'ensemble des résultats.

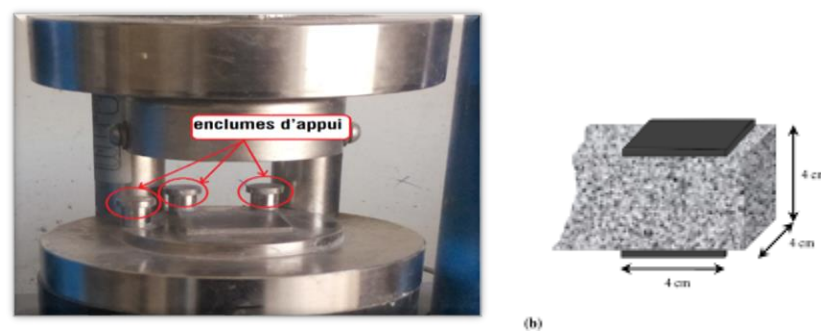


Figure 10 : Essai de compression.

7. Détermination de l'indice d'activité Pouzzolanique

L'indice d'activité, noté i , est défini comme le rapport de la résistance moyenne en compression de mortier avec ajout (ciment expiré dans notre cas) et la résistance moyenne à la compression de mortier témoin (sans addition).

Au sens des normes EN 450 et NFP 18- 506, cet indice est déterminé pour $E/C = 0.5$ et $p=0,25$.

$$i = \frac{\sigma_A}{\sigma_t}$$

Des prismes de $4 \times 4 \times 16$ cm³ doivent être confectionnés pour les deux mortiers respectivement à base de ciment et à base de liant équivalent afin de mesurer les résistances en compression sur les demi-épreuves à 28 jours.

8. Absorption d'eau par capillarité

L'absorption d'eau par capillarité d'un mortier est déterminée selon la prescription de la norme NF EN 772-11 :1989 [36].

Cet essai a été effectué afin d'avoir une idée sur la porosité interne du matériau, en déterminant la masse d'eau que peut absorber les éprouvettes après immersion totale durant une période donnée.

Rappelons que l'essai consiste à prendre la masse des éprouvettes (4×4×16) cm³ du mortier directement après le séchage à une température constante jusqu'à obtenir une masse sèche constante.

L'échantillon est ensuite placé dans un bac, une seule face (4x4cm) étant en contact avec une faible couche d'eau.

Avant la pesée durant des périodes définies, l'éprouvette est essuyée avec une éponge de manière à la débarrasser de son eau superficielle. Une fois la masse saturée obtenue et la masse à sec préalablement connue, nous avons déterminé la masse d'eau absorbée.

L'absorption d'eau par capillarité A_b est exprimée en % de la masse sèche et est calculée par la relation suivante :

$$A_b = \frac{M_a - M_s}{M_s} \times 100$$

M_a : masse de l'échantillon imbibé d'eau.

M_s : masse de l'échantillon sec après passage à l'étuve à 105°C.

Les résultats obtenus sur 3 éprouvettes de chaque type de mortier sont exprimés, en pourcentage, sous la forme de la moyenne de 3 valeurs mesurées.

9. Conclusion

Dans ce chapitre on a défini les modes expérimentaux qui déduisent les caractéristiques physiques des matériaux, le mode de malaxage et de coulage des mortiers.

Partie III :

**Analyse des
Résultats**

1. INTRODUCTION

Ce chapitre présente les résultats des travaux expérimentaux réalisés dans le cadre de notre recherche. Des interprétations seront émises sur les propriétés à l'état frais et durci des mortiers. Pour montrer l'influence d'utilisation d'un ciment expiré traité thermiquement à 200°C et à 400°C pendant 2h en tant qu'ajout dans un mortier, cinq proportions sont testés (0%, 10%, 15%, 20% et 25%).

2. NOMENCLATURE

MT : Mortier Témoin (0% ciment expiré)

200°C M10 : Mortier à 10% ciment expiré traité à 200°C

200°C M15 : Mortier à 15% ciment expiré traité à 200°C

200°C M20 : Mortier à 20% ciment expiré traité à 200°C

200°C M25 : Mortier à 25% ciment expiré traité à 200°C

400°C M10 : Mortier à 10% ciment expiré traité à 400°C

400°C M15 : Mortier à 15% ciment expiré traité à 400°C

400°C M20 : Mortier à 20% ciment expiré traité à 400°C

400°C M25 : Mortier à 25% ciment expiré traité à 400°C

3. RESULTATS ET ANALYSE

a) CARACTERISTIQUE DU MORTIER A L'ETAT FRAIS (MANIABILITE)

Les résultats à l'état frais des mortiers concernent essentiellement les mesures de la maniabilité. Un maniabilimètre à mortier a été utilisés pour déterminer la maniabilité dynamique en mesurant leur temps d'écoulement dans une cuve métallique vibrée.

Les résultats obtenus sont montrées ci-dessous :

Tableau 1 : Résultats de temps d'écoulement en seconde.

	MT	200°C				400°C			
		M10	M15	M20	M25	M10	M15	M20	M25
Temps d'écoulement en (s)	13,22	13,56	15,76	12,09	7,05	13,32	9,19	12,55	8,96

La figure III. 1 ci-dessous présente l'histogramme de temps d'écoulement en seconde des mortiers testés.

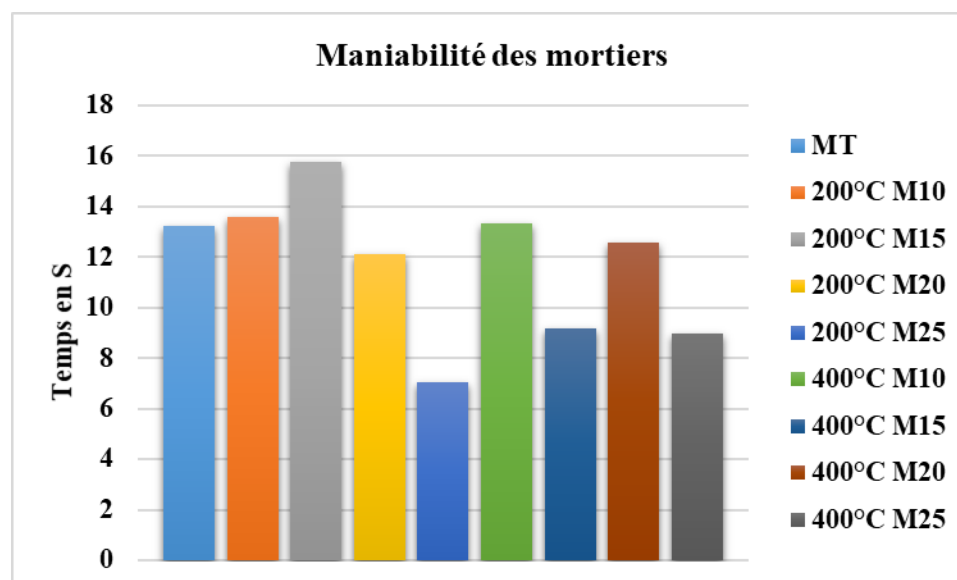


Figure 1 : Histogramme de temps d'écoulement en seconde

Le tableau 1 et la figure 1 présente les temps d'écoulement en secondes pour différents mortiers (MT et (M10, M15, M20, M25) à deux températures, 200°C et 400°C).

On remarque que tous les mortiers MT, 200°C M10, 200°C M15, 200°C M20, 400°C M10, 400°C M20 ont une maniabilité élevée ce qui correspond au mortier fluide facile à couler et à répartir. Les mortiers 200°C M25, 400°C M20, 400°C M25 ont une maniabilité très élevée qui signifie que le mortier est très fluide, auto-nivelant, utilisé dans des cas spécifiques.

b) CARACTERISTIQUE DU MORTIER A L'ETAT DURCI

➤ Absorption d'eau

Les mesures d'absorption d'eau par capillarité effectuées à 28 jour pour tous les mortiers élaborés sont montrées dans le tableau 2 et la figure 2.

Tableau 2: Résultats d'absorption d'eau par capillarité.

	MT	200°C				400°C			
		M10	M15	M20	M25	M10	M15	M20	M25
10 Min	0,20	0,07	0,31	0,29	0,36	0,30	0,15	0,25	0,03
30 Min	0,29	0,15	0,44	0,39	0,46	0,43	0,25	0,39	0,14
1 H	0,41	0,22	0,59	0,51	0,63	0,57	0,35	0,53	0,26
2 H	0,46	0,25	0,70	0,57	0,75	0,66	0,40	0,62	0,36
4 H	0,63	0,37	0,79	0,69	0,91	0,78	0,50	0,76	0,47
24 H	0,70	0,67	1,33	1,20	1,58	1,24	0,93	1,25	1,05
48 H	1,42	0,91	1,68	1,68	2,00	1,54	1,39	1,58	1,45
72 H	1,81	1,13	2,06	2,16	2,43	1,93	1,83	1,87	1,90
96 H	2,17	1,43	2,43	2,64	2,86	2,30	2,23	2,22	2,28

La figure 2 présente les résultats d'absorption d'eau par capillarité.

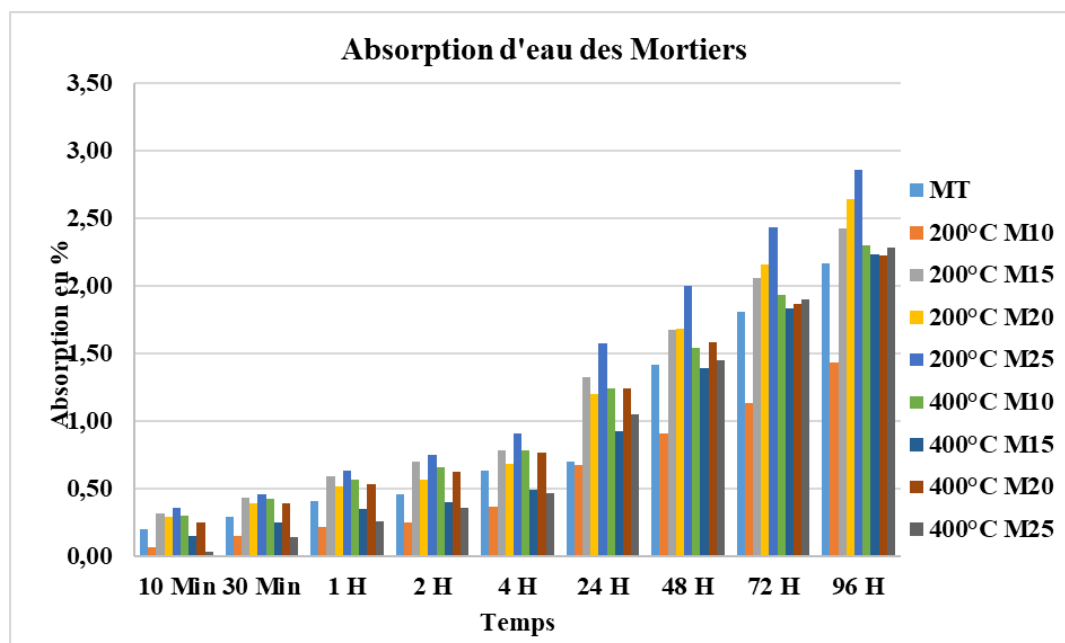


Figure 2: Résultats d'absorption d'eau par capillarité.

Du tableau 2 et la figure 2, on constate que l'absorption d'eau augmente progressivement avec le temps pour tous les types de mortiers testés. Les mortiers à base de 15%, 20% et 25% de ciment expiré traité thermiquement à 400°C montrent une absorption plus faible comparée à ceux traité à 200°C, ce qui suggère que la température de traitement influence significativement à la diminution de la porosité et donc l'absorption d'eau. Le mortier à base de 10% de ciment expiré traité à 200°C affiche des valeurs d'absorption les plus faibles, atteignant près de 1,43% à 96h.

➤ Résistance à la traction par flexion

La résistance à la traction par flexion a été mesurée sur des éprouvettes 4 x 4 x 16 cm³ jusqu'à l'échéance de 28 jours. La moyenne des valeurs les plus proches a été retenue comme résistance moyenne à la traction par flexion.

Le tableau 3 présente les valeurs des résistances à la traction par flexion (MPa) des différents mortiers en fonction du temps.

Tableau 3: Valeurs des résistances à la traction par flexion

	200°C					400°C			
	MT	M10	M15	M20	M25	M10	M15	M20	M25
3	11,58	10,76	10,86	10,83	10,72	10,62	10,82	9,27	10,48
14	12,94	13,22	12,88	13,08	13,16	14,06	14,22	13,13	13,81
28	14,596	13,067	14,572	13,296	13,701	14,173	14,589	13,959	13,915

La figure 3 ci-dessous présente les résistances à la traction des différentes éprouvettes de mortier élaborées avec des taux différents en plus de celles du mortier témoin à différentes échéances.

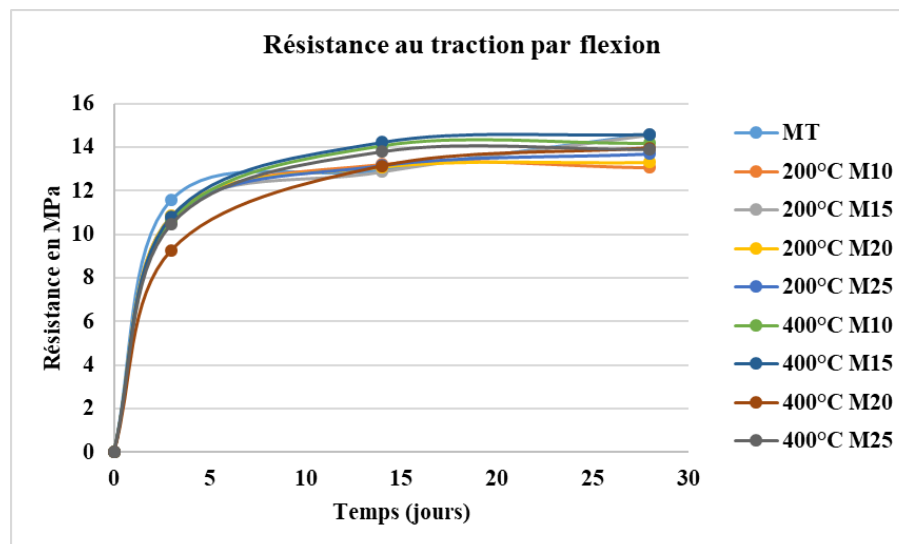


Figure 3 : Courbe de résistance à la traction des différents mortiers.

La figure 4 suivante représente Histogramme de résistance à la traction des différents mortiers.

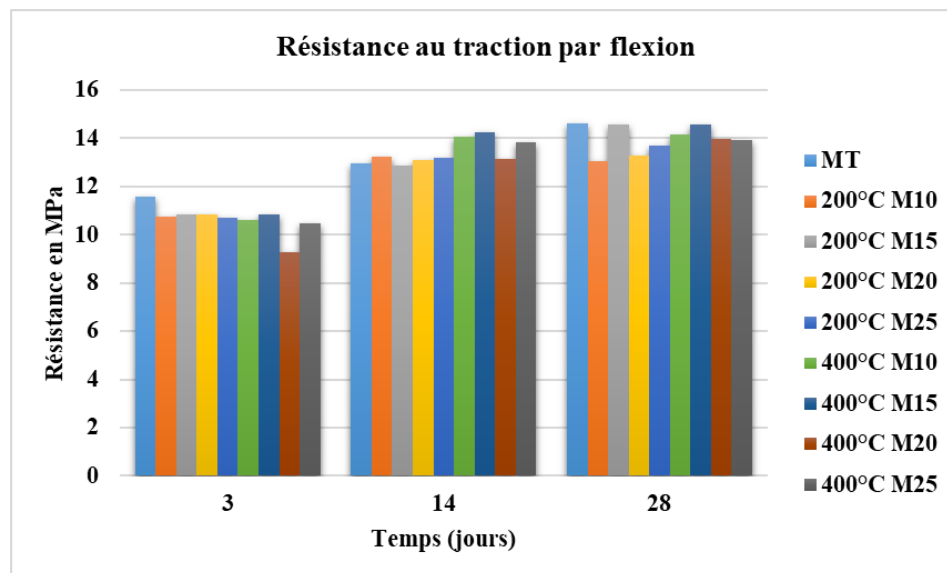


Figure 4 : Histogramme de résistance à la traction des différents mortiers.

Du tableau et des figures 3 et 4, on remarque clairement que toutes les résistances à la traction par flexion ont évolué de la même façon et d'une façon similaire à celles du mortier témoin. On constate aussi une augmentation régulière des résistances à la traction par flexion des différents mortiers avec l'âge (3, 14 et 28 jours). On remarque aussi que les mortiers à base de ciment expiré traités à 200°C et à 400°C montrent généralement une légère diminution de la résistance par rapport au mortier témoin, surtout pour les proportions élevées

de ciment expiré (M20 et M25). Le traitement thermique semble avoir un effet bénéfique sur la résistance à la traction par flexion, notamment pour les mortiers contenant des proportions modérées de ciment expiré (M10 et M15).

➤ Résistance à la compression

La résistance à la compression a été mesurée sur des demi-éprouvettes obtenues après l'essai de traction par flexion (si celles-ci ne sont pas endommagées). Ces mesures ont donc été effectuées sur six (06) demi-éprouvettes. La moyenne arithmétique des valeurs les plus proches a été retenue comme résistance à la compression.

Tableau 4: Résultats des mesures des résistances à la compression en fonction de temps des bétons ordinaires.

MT	200°C				400°C				
	M10	M15	M20	M25	M10	M15	M20	M25	
3	37,33	35,43	36,00	35,70	38,47	31,86	31,95	27,05	35,57
14	42,16	44,20	45,52	40,14	46,08	46,77	45,36	40,99	39,46
28	49,14	47,09	53,75	53,17	53,25	47,70	47,26	51,43	51,38

Les figures 5 et 6 ci-après présentent respectivement, les courbes de résistances à la compression et histogramme de résistance à la compression des différents mortiers

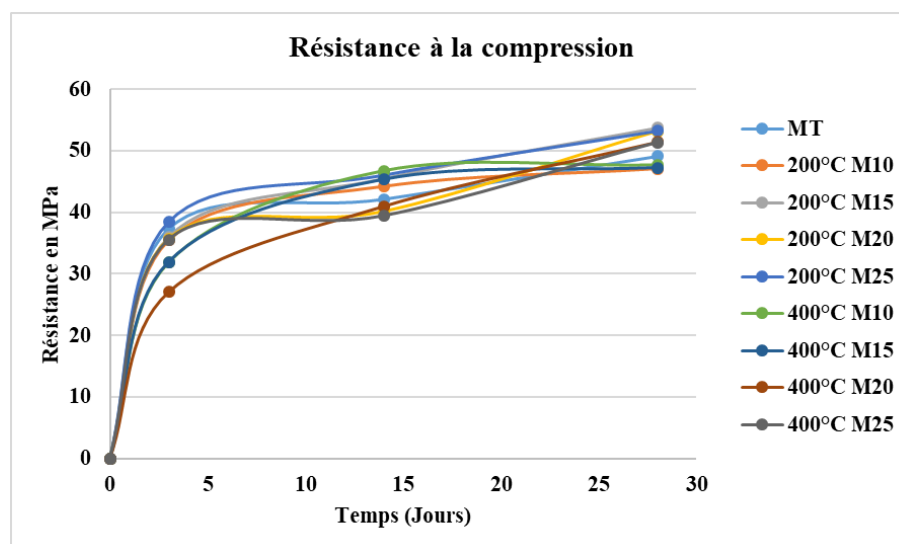


Figure 5 : Courbe de résistances à la compression des différentes éprouvettes.

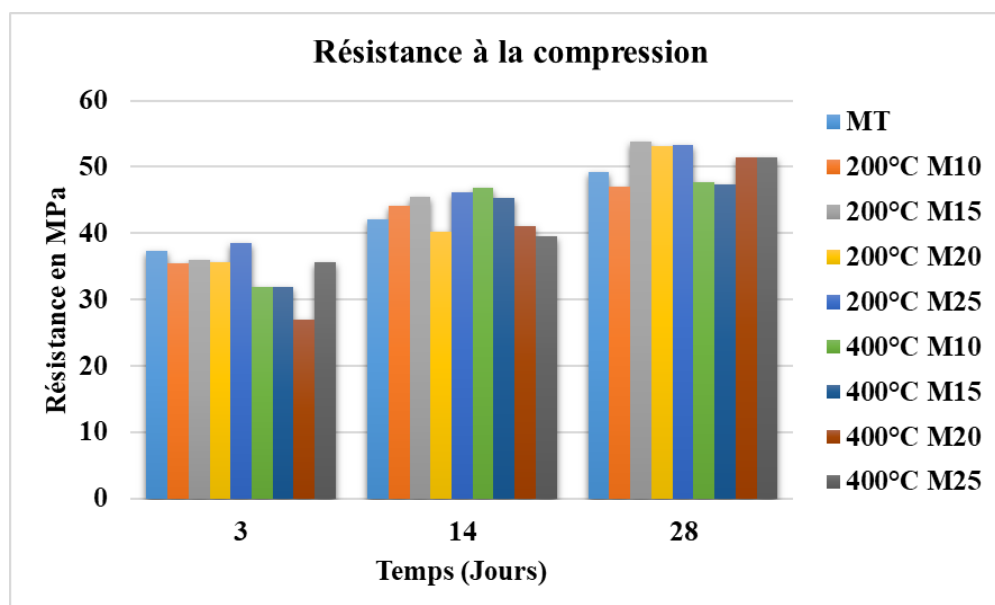


Figure 6 : Histogramme de résistance à la compression.

A première vue, la résistance à la compression augmente régulièrement avec le temps, cela reflète une évolution normale liée à la maturation du mortier.

Du tableau 4 et des figures 5 et 6, on remarque que les mortiers à base de ciment expiré traités à 200°C et à 400°C présentent des résistances supérieures ou égales à celles du MT, notamment pour les proportions élevées de ciment expiré (M20 et M25).

- Le traitement thermique du ciment expiré semble avoir un effet bénéfique sur la résistance à la compression, notamment pour les mortiers contenant des proportions élevées de ciment expiré (M20 et M25).

➤ **Indice d'activité pouzzolanique**

Un mortier contenant 25 % de ciment expiré a été élaboré pour tester sa réactivité. Les résultats de mesures de l'indice d'activité pouzzolanique ont été présentés dans le tableau suivant :

Tableau 5 : Résultats des mesures de l'indice d'activité pouzzolanique

	200°C M25	400°C M25
i	1,001	0,999

On constate que les ciments expirés traités à 200°C et 400°C ont une activité pouzzolanique ($0,67 < i < 1$) proche de 1, et cela peut signifier que le traitement de ciment expiré le rend réactif.

4. CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons effectué des essais sur le mortier à l'état frais et à l'état durci. Nous avons remarqué que le ciment expiré, traité thermiquement à 200°C et à 400°C pendant 2h, a une activité pouzzolanique.

Nous avons aussi comparé et commenté les résultats trouvés, en constatant que les mortiers à base de 20% et 25% ciment expiré traité ont donné des résistances intéressantes et une absorption d'eau proche à celle du mortier témoin.

Conclusion générale et perspectives

CONCLUSION GENERALE

Aujourd'hui, le secteur du bâtiment connaît une forte demande en matériaux de construction, en particulier en ciment, utilisé massivement dans la fabrication du béton et des mortiers. Toutefois, une partie importante du ciment produit devient rapidement inutilisable, souvent en raison de mauvaises conditions de stockage ou de dépassement de la durée de conservation. Dans cette optique, il devient essentiel de développer des solutions innovantes et durables permettant la valorisation de ces ciments expirés, tout en réduisant leur impact environnemental.

Parmi les alternatives envisagées, le traitement thermique du ciment périmé constitue une piste prometteuse. Ce procédé, appliqué dans cette étude à deux niveaux de température (200°C et 400°C), a pour but de réactiver partiellement l'activité hydraulique du ciment et de l'intégrer à des taux de 10 %, 15 %, 20 % et 25 % dans la fabrication de mortiers. L'objectif est à la fois environnemental – réduire les déchets et les émissions de CO₂ – et économique, en désengorgeant les stocks de ciment inutilisé.

La présente étude s'est articulée autour de trois parties dont la première concerne une synthèse de recherche bibliographique reportant des généralités sur les ciments, leurs caractéristiques, son expiration ainsi que le principe de traitement thermique, la seconde porte sur une série d'essais expérimentaux effectués sur les ciments (neufs et expirés), matériaux utilisés (sables concassés et sables de mer) en ce qui concerne leurs propriétés physiques (masse volumiques, granularité, absorption), et La troisième partie porte sur l'analyse des résultats, leur discussion et l'évaluation comparative des formulations de mortier.

Notre projet a été mené dans le but d'atteindre un principal objectif qui consiste à recycler un ciment expiré traité thermiquement à 200 et 400 ° C pendant deux heures dans un mortier.

Il a été constaté que le traitement thermique du ciment expiré, en particulier à 200°C avec un taux de substitution de 15%, améliore évidemment les performances mécaniques du mortier par rapport un mortier témoin. Néanmoins, les résistances mécaniques des mortiers à la flexion et à la compression restent proche à celle du mortier témoins. Les mortiers substitués par un ciment expiré ont une évolution d'absorption d'eau similaire et proche à celle du mortier témoin.

CONCLUSION GENERALE

D'après cette étude, on peut dire que le traitement thermique de ciment expiré peut être une solution durable et économique pour la réutilisation des ciments expirés dans des applications non structurales, tout en contribuant à la réduction des déchets et à la durabilité environnementale du secteur de la construction.

Ce travail, bien qu'orienté vers une approche expérimentale préliminaire, ouvre la voie à de nouvelles perspectives de recherche, parmi lesquelles nous proposons :

- Notre travail s'est basé sur les mortier, nous proposons de faire les mêmes essais sur les bétons et de procéder à des essais approfondis.
- Etude chimique et minéralogique de ciment expiré.
- Enfin, nous proposons une étude de quelques indicatifs de durabilité (carbonatation, gel-dégel...) pour compléter les connaissances apportées par la présente recherche.

En conclusion, le recyclage du ciment périmé par traitement thermique représente une alternative concrète pour une construction plus durable et respectueuse de l'environnement.

Références
bibliographiques

REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE

- [1] Secrétariat d'État au Plan, Algérie. (s.d.). Statistiques de la production du ciment en Algérie. Rapport institutionnel.
- [2] Gay-Lussac, De Prony et Girard : Rapport fait à l'Académie Royale des Sciences sur un ouvrage de M. Vicat, Ingénieur des Ponts et Chaussées intitulé recherches expérimentales sur les chaux de construction. 1819.
- [3] Robert BASTIER, Alexandre BOCAN, Bernard GILBERT, Alain REGNAULT, Four rotatif et atelier de cuisson, Fours de cimenterie - Ateliers de cuisson du clinker, Date de publication : 10 juil. 2000
- [4] Benhamou, O. (1994) « Comportement rhéologique des coulis de liants hydrauliques ultrafins destinée à l'injection », Thèse de doctorat en géologie de L'Ingénieur. Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, 332 p.
- [5] Patrick Guiraud, Norme ciment NF EN 197-1 : Composition des ciments courants, La norme NF EN 197-1 définit 27 ciments courants regroupés en cinq types selon leur composition. DÉCEMBRE 2020
- [6] CHERAIT Yacine, Nouvelle élaboration d'un liant hydraulique, Thèse de Doctorat en Sciences, Présentée à l'Université 08 mai 1945 de Guelma, Faculté des Sciences et de la Technologie, Département de : Génie Civil & Hydraulique, 2018
- [7] A. Guillerme : Bâtir la ville. Révolution dans les matériaux de construction, France-Grande-Bretagne (1760-1840). 1995.
- [8] G. Schumacher and L. Juniper. Coal utilisation in the cement and concrete industries. In The Coal Handbook: Towards Cleaner Production, pages 387– 426. Elsevier, 2013
- [9] MICHEL M., -Accélération de ciment au laitier par du ciment sulfo-alumineux: thèse. - Lyon: L'institut National des sciences Appliqués de Lyon, 2009

[10] Cours Intensif (1994) Les injection de coulis de ciment: Méthodes de contrôle en laboratoire et en chantier. Notes de cours intensif sur l'injection présenté le 9- 10 mai 1994 à L'Université de Sherbrooke. Préparé par T. Mnif et A Yahya sous la direction de G. Ballivy et K. Khayat, Mai 1994, p 200.

[11] NF EN 197-1, Ciment - Partie 1 : composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants, Normes nationales et documents normatifs nationaux, avril 2012

[12] Bendahmane Miloud Sid Ali, Bouattou Zakaria Bakir, Guerzou Tourkia, Elaboration d'un mortier à base d'un ciment expiré, mémoire de fin d'études, de master académique, filière : génie civil, option : structures, 2024

[13] <https://blog.entrepot-du-bricolage.fr/ciment-perime>

[14] Hocine Cherfa, Contrôle de qualité, Plus de 170 tonnes de ciment périmé saisies, Par nawel.d 20 avril 2013, <https://www.algerie360.com/controle-de-qualite-plus-de-170-tonnes-de-ciment-perime-saisies>

[15] Houlteurbe Dagou Houljakbe, Etudes comparatives des caractéristiques mécaniques des ciments, Éditions universitaires européennes, Yıldız Technical Université, Juin 2018

[16] Sathawane, S. H., Vairagade, V. S., & Kene, K. S. (2013). Effect of aging on cement properties and its suitability for construction purposes. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 25(7), 839–847. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000638](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000638)

[17] Neville, A. M. (2011). *Properties of Concrete* (5^e éd.). Pearson Education Limited.

