

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة غرداية

Université de Ghardaïa

N° d'enregistrement

/...../...../...../.....



كلية العلوم والتكنولوجيا

Faculté des Sciences et de la Technologie

قسم الري والهندسة المدنية

Département Hydraulique et Génie Civil

Mémoire

Pour l'obtention du diplôme de Master

Domaine: Sciences et Technologies

Filière: Génie civil

Spécialité: Structure

Effet de l'incorporation de la pâte de ciment recyclée sur les propriétés du mortier

Soutenue publiquement le /06/2025.

Par

Chitoura Amal & GUENZOUL Israa

Devant le jury composé de:

| Membres de Jury | Grade | Qualité | Domiciliation |
|-------------------------|-------|-----------|------------------------|
| Dr . Laroui Abdelbasset | M.C.A | Président | Université de Ghardaïa |
| Dr . Salhi Imad | M.C.A | Examineur | Université de Ghardaïa |
| Dr. Dehane Sarra | M.C.B | Encadreur | Université de Ghardaïa |

Année universitaire 2024/2025

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



إهداء

{ وَقُلْ رَبِّ زِدْنِي عِلْمًا }

مهما كتبت من عبارات، لن أجد أصدق من قوله تعالى

{ وَمَا تَوْفِيقِي إِلَّا بِاللَّهِ }

[سورة هود: 88]

بحمد الله وفضله، أهدي ثمرة جهدي وتخرّجي من جامعة غرداية – كلية العلوم والتكنولوجيا،
تخصص الهندسة المدنية:

إلى من قال فيهما الله تعالى: { وَقَضَىٰ رَبُّكَ أَلَّا تَعْبُدُوا إِلَّا إِيَّاهُ وَبِالْوَالِدَيْنِ إِحْسَانًا }

[سورة الإسراء]

من غرسا في قلبي حبّ العلم، وكانا لي الدعاء والسند،
إليكما كلّ الامتتان، وكلّ الفخر، فأنتم سرّ الإنجاز وروح النجاح.
ما كنت لأصل إلى هذه اللحظة لولا دعمكما، صبركما، وإيمانكما بي.

وإلى نفسي،

قنزول إسراء...

أقولها بفخر: شكرًا لك.

شكرًا لكل لحظة صبر، ولكل تعبٍ لم يذهب سُدى.

لقد فعلتها، وها هو الحلم يصبح واقعًا.

وأهدي هذا النجاح لكلّ من ساندي بكلمة،

ولكلّ من آمن بأنني أستحقّ الوصول.

إهداء

بسم الله الرحمن الرحيم

(إِنِّي جَزَيْتُهُمُ الْيَوْمَ بِمَا صَبَرُوا أَنَّهُمْ هُمُ الْفَائِزُونَ)

سورة المؤمنون، الآية 111

إلى أبي العزيز، سندي وفخري، الذي زرع لي الراحة وأزال الأشواك من طريقي، شكرًا لتعبك ودعواتك.

إلى أُمي الحبيبة، صديقتي وملهمتي، التي حملت اسمي في دعائها ليلاً ونهارًا، شكرًا لأخلاقك وصبرك.

إلى أخي نوردين، قوتي وسندي، أهديك هذا النجاح بحب وامتنان.

إلى أختي الحبيبة خلود، التي دعمتني بحبها وقوتها، فلولاك ما وصلت إلى ما أنا عليه اليوم.

إلى أخواتي مباركة ووداد، شريكات الضحكة والدمعة، شكرًا لحبكما الذي جعل الطريق أسهل.

إلى جدي الحنونة، بركتي بدعائها الصادق، شكرًا لنورك في حياتي.

اليوم، أطوي صفحة التعب وأكتب فخرًا لا يُنسى. تلاشت العثرات، وابتسم الأفق. وجدت السلام والفرح،

وحلمي أزهر.

الحمد لله.

أمال

Remerciements

Nous remercions avant tout Dieu Tout-Puissant pour sa grâce qui a permis la réalisation de ce travail. Nos sincères remerciements vont à notre encadrante, Mme

Dehane Sarra, pour son accompagnement constant, ses conseils précieux et ses encouragements motivants, qui nous ont aidés à surmonter les obstacles et à avancer avec détermination. Que Dieu la récompense pour son savoir et ses efforts.

Nous exprimons notre profonde gratitude aux membres du jury pour avoir accepté d'évaluer ce travail, leur présence étant une source d'honneur et de motivation. Nous remercions également nos professeurs pour leurs enseignements et leur soutien, ainsi que nos camarades pour leur esprit d'entraide, en leur souhaitant pleine réussite.

Un grand merci à l'équipe du laboratoire L.T.P.S pour leur soutien essentiel et leur collaboration professionnelle, qui ont facilité les expérimentations et la réussite de ce projet. Enfin, nous adressons notre reconnaissance à toutes les personnes ayant contribué, de près ou de loin, à ce travail.

Résumé :

Cette étude vise à évaluer l'effet du remplacement partiel du ciment par une poudre de ciment recyclé (CR), issue d'un ciment mal conservé et préhydraté, puis activée thermiquement, sur les propriétés des mortiers. Des pourcentages de remplacement allant jusqu'à 50 % ont été testés afin d'analyser leur influence sur la maniabilité, les temps de prise, les résistances mécaniques, la masse volumique, l'absorption capillaire, ainsi que la durabilité en milieu acide.

Les résultats montrent que le ciment recyclé activé entraîne un retard modéré des temps de prise et une diminution progressive des résistances mécaniques avec l'augmentation de pourcentage de substitution, en particulier au jeune âge. Toutefois, des pourcentages faibles (jusqu'à 15 %) permettent de conserver des performances mécaniques acceptables. Les mélanges contenant jusqu'à 25 % de CR ont présenté une absorption capillaire plus faible et une résistance comparable, voire meilleure, à l'attaque acide par rapport au témoin, suggérant un comportement durable potentiellement amélioré. Ainsi, l'utilisation du ciment préhydraté activé thermiquement apparaît prometteuse, à condition de limiter son dosage ($\leq 15\%$) pour maintenir une bonne performance mécanique et durabilité.

Mots clés : Mortier, ciment, préhydratation, traitement thermique, résistance, durabilité.

الملخص :

تهدف هذه الدراسة إلى تقييم تأثير الاستبدال الجزئي للإسمنت بمسحوق إسمنت معاد تدويره (CR) ، المستخلص من إسمنت محفوظ بشكل سيئ مما أدى لترطيبه الأولي و ذلك بعد تفعيله حرارياً. تم اختبار تأثير نسب استبدال تصل إلى 50% على خصائص الملاط منها : قابلية التشغيل، وأوقات الشك، والمقاومة الميكانيكية، والكثافة ، والامتصاص الشعري، فضلاً عن المتانة في بيئة حمضية. أظهرت النتائج أن الإسمنت المعاد تدويره والمفعّل حرارياً يؤدي إلى تأخير معتدل في أوقات الشك وانخفاض تدريجي في المقاومة الميكانيكية مع زيادة نسبة الاستبدال، خاصة في الأعمار المبكرة. ومع ذلك، تتيح النسب المنخفضة (حتى 15%) الحفاظ على أداء ميكانيكي مقبول. كما أظهرت الخلطات التي تحتوي على ما يصل إلى 25% من الإسمنت المعاد تدويره امتصاصاً شعرياً أقل ومقاومة مماثلة أو أفضل للهجوم الحمضي مقارنة بالعينة المرجعية، مما يشير إلى تحسين محتمل في السلوك الدائم. وبالتالي، يبدو استخدام الإسمنت المعاد تدويره والمفعّل حرارياً واعداً، بشرط تحديد الجرعة (أقل من 15%) للحفاظ على أداء ميكانيكي جيد ومتانة .

الكلمات المفتاحية: ملاط، الإسمنت، ترطيب أولي، معالجة حرارية، مقاومة، متانة

Abstract:

This study aims to evaluate the effect of partially replacing cement with recycled cement powder (RC), derived from improperly stored and prehydrated cement that was activated thermally, on the properties of mortars. Replacement percentages of up to 50% were tested to assess their influence on workability, setting times, mechanical strength, bulk density, capillary absorption, and durability to acid attack.

The results show that activated recycled cement causes a moderate delay in setting times and a progressive reduction in mechanical strength with increasing substitution percentages, particularly at early ages. However, low replacement levels (up to 15%) allow for acceptable mechanical performance to be maintained. Mixes containing up to 25% RC exhibited lower capillary absorption and comparable or even better resistance to acid attack compared to the control mix, suggesting potentially improved durability. Therefore, the use of thermally activated prehydrated cement appears to be a promising approach, provided that low replacement levels ($\leq 15\%$) are used to ensure satisfactory mechanical performance and durability

Keywords: Mortar, cement, prehydration, thermal treatment ,strength, durability

Notations

| | |
|-----------------------------|--|
| °C : | Degrés Celsius |
| PCH | Pâte de ciment hydratée |
| DCD | Déchets issus de la construction et de la démolition |
| CR | Ciment recyclé |
| Ca(OH)₂ : | Hydroxyde de calcium |
| C-S-H : | Silicate de calcium hydraté |
| CH : | Hydroxyde de calcium |
| C₃S : | Silicate tricalcique |
| C₂S : | Silicate bicalcique |
| C₃A : | Aluminate tricalcique |
| C₄AF | Aluminoferrite tétracalcique |
| ES : | Équivalent de sable |
| M_f | Module de finesse |
| Cu | Coefficient d'uniformité |
| ρ_{app} : | Masse volumique apparente |
| ρ_{abs} : | Masse volumique absolue |
| MB : | Valeur de bleu méthylène |
| CaCO₃ : | Carbonate de calcium |
| CaO : | Oxyde de calcium |
| CaO : | Oxyde de calcium |
| LTPS : | Laboratoire des Travaux Publics du Sud |

Sommaire

| | |
|---|-----------|
| اهداء | I |
| Remerciements | III |
| Résumé | IV |
| Notations | VI |
| Sommaire | VII |
| Liste des Figures | IX |
| Liste des Photos | X |
| Liste des Tableaux | XII |
| Introduction Générale | 01 |
| Chapitre I : Étude Bibliographique | |
| Introduction | 03 |
| I.1. Recyclage du béton: : potentiels, traitements et applications | 03 |
| I.1.1. Méthode de traitement et recyclage du béton | 05 |
| I.1.2. Granulats de béton recyclé | 06 |
| I.1.3. Pâte de ciment hydratée | 07 |
| I.2. Réactivation de la pâte de ciment hydraté par traitement thermique | 09 |
| I.2.1. Produits déshydratée issus du ciment thermo-activé | 12 |
| I.2.2. Propriétés physiques des matériaux cimentaires contenant du ciment déshydraté | 13 |
| I.2.3. Propriété mécanique et microstructure des matériaux cimentaires contenant du ciment déshydraté | 15 |
| I.3. Recyclage de ciment préhydraté | 20 |
| Conclusion | 23 |
| Références Bibliographique | 25 |
| Chapitre II : Matériaux et Procédures | |
| Introduction | 29 |
| II.1. Caractérisation des matériaux utilisés | 29 |
| II.1.1. Liants | 29 |
| II.1.1.1. Ciment recyclé (CR) | 29 |
| II.1.1.2. Ciment de référence | 31 |
| II.1.1.3. Analyses des ciments utilisés | 32 |
| II.1.2. Sable | 34 |
| II.1.3. Eau de gâchage | 39 |

| | |
|---|-----------|
| II.2. Étude de l'influence de ciment recyclé sur l'hydratation et la stabilité du volume du ciment | 39 |
| II.3. Étude de l'influence de ciment recyclé sur la résistance mécanique du mortier | 40 |
| II.3.1. Formulation et Confection des éprouvettes | 40 |
| II.3.2. Résistance mécanique du mortier | 41 |
| II.4. Étude de l'influence de ciment recyclé sur la durabilité du mortier | 42 |
| II.4.1. Absorption capillaire | 42 |
| II.4.2. Résistance à l'attaque acide | 43 |
| Conclusion | 44 |
| Références Bibliographique | 45 |
| Chapitre III : Résultats et interprétations | |
| Introduction | 47 |
| III.1. Étude de l'effet de ciment recyclé sur l'hydratation et la stabilité du volume du ciment | 47 |
| III.2. Étude de de l'effet de ciment recyclé sur la masse volumique du mortier | 49 |
| III.3. Étude de l'effet de ciment recyclé sur la résistance mécanique du mortier | 50 |
| III.4. Étude de l'effet de ciment recyclé sur la durabilité du mortier | 53 |
| III.4.1. Absorption capillaire | 53 |
| III.4.2. Résistance à l'attaque acide | 54 |
| Conclusion | 57 |
| Références Bibliographique | 58 |
| Conclusion Générale et Perspectives | 59 |
| Annexe | 61 |

Liste des Figures

| | |
|--|-----------|
| Figure I.1. Classification générale et composants des déchets de construction et de démolition. | 04 |
| Figure I.2. Schéma du processus de recyclage du béton. | 06 |
| Figure I.3. Résistance à la compression des mortiers contenant du PCH. | 08 |
| Figure I.4. Valeurs d'étalement en fonction de pourcentage de PCH. | 09 |
| Figure I.5. Matériaux cimentaires recyclés par thermoactivation. | 11 |
| Figure I.6. Demande en eau des poudres de ciment déshydratées en fonction de la température de déshydrations. | 14 |
| Figure I.7. Temps de prise des poudres de ciment déshydratées en fonction de la température de déshydrations. | 15 |
| Figure I.8. Variations des résistances mécaniques des mortiers recyclés par rapport au mortier de référence en fonction de pourcentage de remplacement. | 16 |
| Figure I.9. Variations de la résistance à la compression des poudres de ciment déshydratées en fonction de la température de déshydrations. | 17 |
| Figure I.10. Comparaisons des résistances à compression des mortiers contenant différents types de ciment recyclé. | 18 |
| Figure I.11. Pourcentage de surface pour chaque phase : pores, C-S—H, CH et produits anhydres. | 19 |
| Figure I.12. Déchet de ciment préhydraté. | 20 |
| Figure I.13. Evolution de la résistance à compression des mortiers contenant de ciment préhydraté. | 22 |
| Figure I.14. Relation entre pourcentage de ciment expiré et consistance. | 24 |
| Figure II.1. Procédure de traitement thermique de ciment. | 31 |
| Figure II.2. Analyse granulométrique de sable. | 35 |
| Figure II.3. Essai d'absorption capillaire. | 42 |

Liste des Photos

| | |
|--|-----------|
| Photo II.1. Déchets de ciment préhydraté. | 29 |
| Photo II.2. Étapes de préparation de ciment recyclé. | 30 |
| Photo II.3. Ciment utilisé. | 31 |
| Photo II.4 Ciment préhydraté après calcination. | 33 |
| Photo II.5. Mesure de la masse volumique absolue de ciment. | 33 |
| Photo II .6. Sable utilisé. | 34 |
| Photo II.7. Analyse granulométrique de sable. | 35 |
| Photo II.8. Masse volumique apparente de sable. | 36 |
| Photo II.9. Masse volumique absolue de sable. | 37 |
| Photo II.10. Essai équivalent de sable. | 37 |
| Photo II.11. Essai équivalent de sable. | 38 |
| Photo II.12. Essai de prise de ciment. | 40 |
| Photo II.13. Essai de la stabilité de volume du ciment. | 40 |
| Photo II.14. Mesure de la résistance mécanique du mortier. | 41 |
| Photo II.15. Mesure de résistance à l'attaque acide. | 41 |
| Photo III.1. Aspect visuel des mortiers après immersion dans l'acide. | 57 |

Liste des Graphes

| | |
|--|-----------|
| Graphe III.1. Variation des temps de prises en fonction du pourcentage de ciment recyclé (CR). | 47 |
| Graphe III.2. Variation de la masse volumique avec le pourcentage de ciment recyclé (CR). | 49 |
| Graphe III.3. Variation de la résistance à la compression du mortier en fonction du pourcentage de ciment recyclé (CR). | 51 |
| Graphe III.4. Variation de la résistance à la traction du mortier en fonction du pourcentage de ciment recyclé (CR). | 52 |
| Graphe III.5. Effet de ciment recyclé (CR) sur l'absorption capillaire de mortier. | 53 |
| Graphe III.6. Perte de la résistance à la compression après attaque acide. | 55 |
| Graphe III.7. Perte masse après attaque acide. | 56 |

Liste des Tableaux

| | |
|--|-----------|
| Tableau I.1. Exemples de réutilisation des déchets de bétons démolis. | 05 |
| Tableau I.2. Composition chimique du ciment avant et après exposition à l'humidité. | 21 |
| Tableau I.3. Composition minéralogique du ciment neuf et du ciment expiré. | 21 |
| Tableau II.1. Caractéristiques chimiques et minéralogiques du ciment. | 32 |
| Tableau II.2. Caractéristiques physiques du ciment. | 32 |
| Tableau II.3. Masses volumiques des matériaux cimentaires. | 34 |
| Tableau II.4. Analyse granulométrique de sable. | 35 |
| Tableau II.5. Résultats des masses volumiques de sable. | 37 |
| Tableau II.6. Résultats des essais de propreté. | 38 |
| Tableau II.7. Analyses chimiques de sable. | 38 |
| Tableau II.8. Résultats des analyses de l'eau de gâchage. | 39 |
| Tableau II.9. Formulation des mortiers étudiés. | 40 |
| Tableau III.1. Effet de ciment recyclé sur l'hydratation et la stabilité du volume du ciment. | 48 |
| Tableau III.2. Variation de la résistance mécanique du mortier en fonction du pourcentage de ciment recyclé (CR). | 58 |
| Tableau III.3. Variation de l'absorptivité du mortier en fonction du pourcentage de ciment recyclé (CR). | 54 |

Introduction Générale

Introduction Générale

Le béton est le matériau le plus utilisé pour les applications structurelles dans le secteur de la construction [Carrico *et al.*, 2020]. Mais la croissance continue de sa demande a considérablement amplifié son impact environnemental, principalement lié à l'exploitation intensive de ressources naturelles et l'émission massive de dioxyde de carbone (CO₂) dans l'atmosphère. Par conséquent, le développement de béton plus durable est devenu une priorité urgente pour les chercheurs ces dernières années.

Le béton contient généralement entre 300 et 400 kg de ciment par mètre cube, ce qui fait du ciment le principal responsable de l'empreinte carbone du béton [Flower *et al.*, 2017]. Le processus de fabrication du ciment est à l'origine de plus de 80 % des émissions de CO₂ liées à la production du béton, représentant ainsi entre 5-7 % des émissions annuelles mondiales de CO₂ [Manddalena *et al.*, 2018]. Afin de réduire ces émissions, plusieurs recherches ont été menées sur le remplacement partiel du ciment par diverses additions minérales telles que les cendres volantes, le laitier de haut fourneau, les pouzzolanes naturelles, la fumée de silice ou encore le filler calcaire [Bordy *et al.*, 2017]. Ces dernières années, une nouvelle méthode de valorisation des déchets cimentaires a été proposée, basée sur l'activation thermique des déchets de ciment hydratés afin de restaurer leur capacité hydraulique [Bogas *et al.*, 2010]. Cette approche, inspirée des observations faites sur le comportement post-incendie du béton, permet de produire un ciment recyclé à faible impact environnemental. Contrairement au ciment Portland traditionnel, qui nécessite des températures de production avoisinant les 1500 °C, ces liants thermo-activés peuvent être obtenus à des températures bien plus basses, de l'ordre de 450 à 800 °C [Wang *et al.*, 2018].

Lorsqu'il n'est pas utilisé dans les délais prévus ou stocké sans protection adéquate, le ciment devient sensible à l'humidité ambiante [Meddah *et al.*, 2022]. Il réagit alors avec la vapeur d'eau présente dans l'air, entraînant une préhydratation partielle de ses composants. Chaque année, plusieurs tonnes de ce type de déchets cimentaires sont générées sur les chantiers et dans les dépôts mal protégés. Leur accumulation constitue une perte économique et un enjeu environnemental majeur. Le recyclage de ce ciment préhydraté apparaît donc comme une solution écologique prometteuse, permettant à la fois de valoriser ce déchet et de réduire la pression sur les ressources naturelles lié à la production de ciment.

Dans ce contexte, la présente étude examine l'effet du remplacement partiel du ciment par une poudre de ciment préhydraté, issue d'un ciment ayant subi une mauvaise conservation, entraînant sa préhydratation et son agglomération. Des investigations ont été menées sur l'hydratation, les propriétés mécaniques et la durabilité des mortiers, afin d'analyser l'influence de ce substitut cimentaire et d'évaluer son potentiel d'utilisation dans la formulation de mortiers et bétons plus durables. Cette étude vise à approfondir les connaissances sur l'utilisation d'un ciment préhydraté activé thermiquement dans les mortiers, un sujet encore peu exploré dans la littérature scientifique

Ce mémoire est organisé en trois chapitres, en complément de l'introduction et de la conclusion générale.

Chapitre I: une revue bibliographique approfondie sur le recyclage du béton et la réactivation de la poudre de ciment hydratée par traitement thermique et son utilisation comme liant alternatif.

Chapitre II: une présentation détaillée des matériaux sélectionnés et des méthodes expérimentales adoptées pour conduire les essais.

Chapitre III: une analyse complète des résultats obtenus ainsi que leur interprétation pour en tirer des conclusions pertinentes.

Chapitre I

Étude bibliographique

Introduction :

L'intégration de matériaux recyclés dans le secteur de la construction s'impose comme une priorité pour répondre aux défis environnementaux et économiques actuels. Parmi ces matériaux, la pâte de ciment recyclée suscite un intérêt croissant en raison de son potentiel à remplacer partiellement le ciment traditionnel dans la fabrication des bétons et mortiers. Cette approche contribue à réduire l'empreinte écologique de l'industrie du bâtiment tout en valorisant les déchets issus de la démolition et de la déconstruction.

Ce chapitre vise à présenter les différentes stratégies de recyclage du béton, particulièrement le traitement et la valorisation de la poudre de ciment hydratée (PCH). Il aborde les méthodes de traitement thermique permettant de réactiver l'activité hydraulique du ciment, les propriétés physiques et mécaniques des matériaux cimentaires obtenus, ainsi que les effets d'intégration du ciment préhydraté comme liant alternatif sur les propriétés du matériau cimentaire.

I.1. Recyclage du béton : : potentiels, traitements et applications:

Avec le développement rapide de l'économie et de l'urbanisation, la demande croissante en nouvelles infrastructures a entraîné une accélération du rythme de construction, provoquant une augmentation significative de la consommation de béton et de mortier. Cette production a des impacts environnementaux considérables en raison de l'épuisement des ressources naturelles et des émissions de dioxyde de carbone [Siriruang *et al.*, 2016]. La consommation de béton et de mortier représente environ 46 % de l'ensemble des matériaux extraits de la Terre [Shah *et al.*, 2022]. De plus, la fabrication d'une tonne de ciment génère près d'une tonne de CO₂ émis dans l'atmosphère [Monteiro *et al.*, 2017]. Par ailleurs, l'industrie de la construction génère une quantité considérable de déchets de construction et de démolition [Papamichael *et al.*, 2023].

Les déchets issus de la construction et de la démolition (DCD) représentent environ 30 à 40 % du flux total de déchets solides dans le monde [Chen *et al.*, 2021]. Ces déchets proviennent à la fois d'activités humaines planifiées (construction, rénovation, démolition) et d'événements naturels majeurs tels que les séismes, les inondations ou les glissements de terrain (Figure I.1). Parmi eux, le béton durci constitue entre 40 et 85 % des déchets de démolition considérés comme potentiellement valorisables [Rodriguez-Morales *et al.*, 2024].

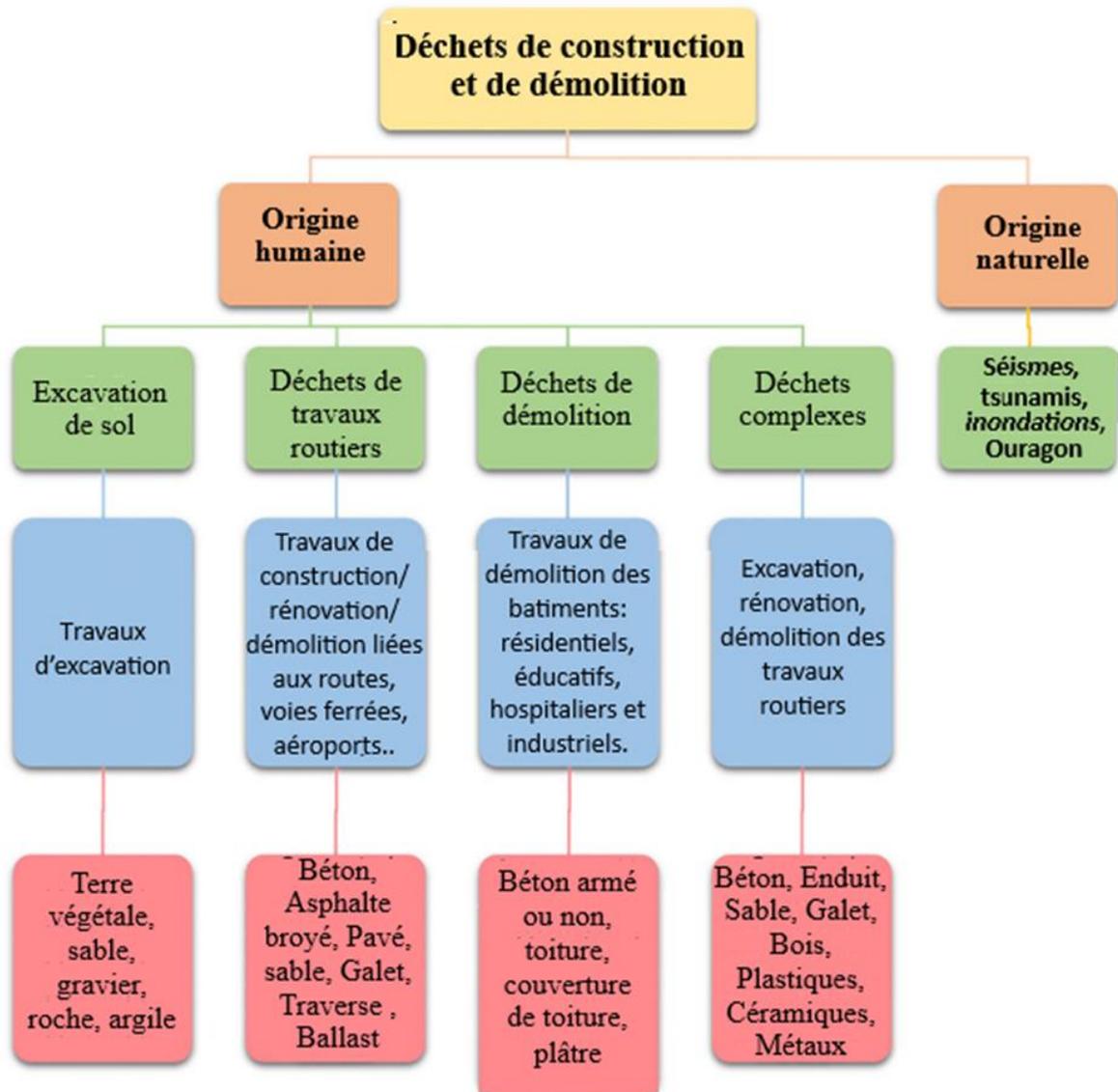


Figure I.1. Classification générale et composants des déchets de construction et de démolition. (Source : [Papamichael et al., 2023])

Dans de nombreuses régions du monde, la majorité des déchets de béton sont mis en décharge ou enfouis [Chen et al., 2021], engendrant d'importants problèmes environnementaux et sociaux. Par conséquent, le recyclage du béton et ciment s'impose comme une solution durable qui permet non seulement de réduire la pollution environnementale et de préserver les ressources naturelles, mais également de limiter la consommation d'énergie et de transport [Lauritzen, 2004].

I.1.1. Méthode de traitement et recyclage du béton :

Comme illustré dans le Tableau I.1 et la Figure I.2, le recyclage actuel du béton repose principalement sur son concassage, permettant sa transformation puis réutilisation dans diverses applications [Lauritzen, 2004], [Kawano, 1995]:

- **Réutilisation directe** (sans transformation majeure) : Par exemple, les blocs de béton de démolition peuvent être taillés et utilisés comme pavés pour les routes, les trottoirs ou l'aménagement paysager. De même, les débris de grande taille (20–40 cm) peuvent être employés pour renforcer les digues et les berges, protégeant ainsi ces infrastructures contre l'érosion et les dégâts liés à l'eau.
- **Concassage pour réutilisation comme granulats recyclés** : Après concassage, les fragments de moins de 50 mm peuvent être utilisés comme sous-couche routière, remblai ou matériau de fondation, améliorant ainsi la stabilité des routes et des bâtiments. Lorsqu'il est broyé encore plus finement (moins de 40 mm), le béton recyclé peut être utilisé comme granulats pour le béton ou l'asphalte. Il peut également servir de sous-couche pour les routes ou de remblai dans divers projets de construction.
- **Réutilisation de la poudre de béton** (sous-produit du concassage) : Elle est utilisée comme charge dans les enrobés bitumineux, contribuant à leur durabilité. Elle peut également servir à la stabilisation des sols, renforçant les terrains fragiles afin de les rendre aptes à la construction. La pâte de ciment hydratée (PCH) peut être aussi utilisée comme ajout cimentaire.

Tableau I.1. Exemples de réutilisation des déchets de bétons démolis. (Source : [Kawano, 1995])

| Élément démolé | Réutilisations possibles |
|-------------------------------------|--|
| Blocs de béton démolé | Récif artificiel, pavés. |
| Débris de 20–40 cm | Protection des digues. |
| Béton concassé (moins de 50 mm) | Sous-couche routière, remblai, matériaux de fondation. |
| Béton concassé (moins de 40 mm) | Granulat pour béton et enrobé bitumineux, sous-couche routière, remblai. |
| Poudre (sous-produit du concassage) | Charge pour enrobés bitumineux, stabilisation des sols ou comme ajout cimentaire |

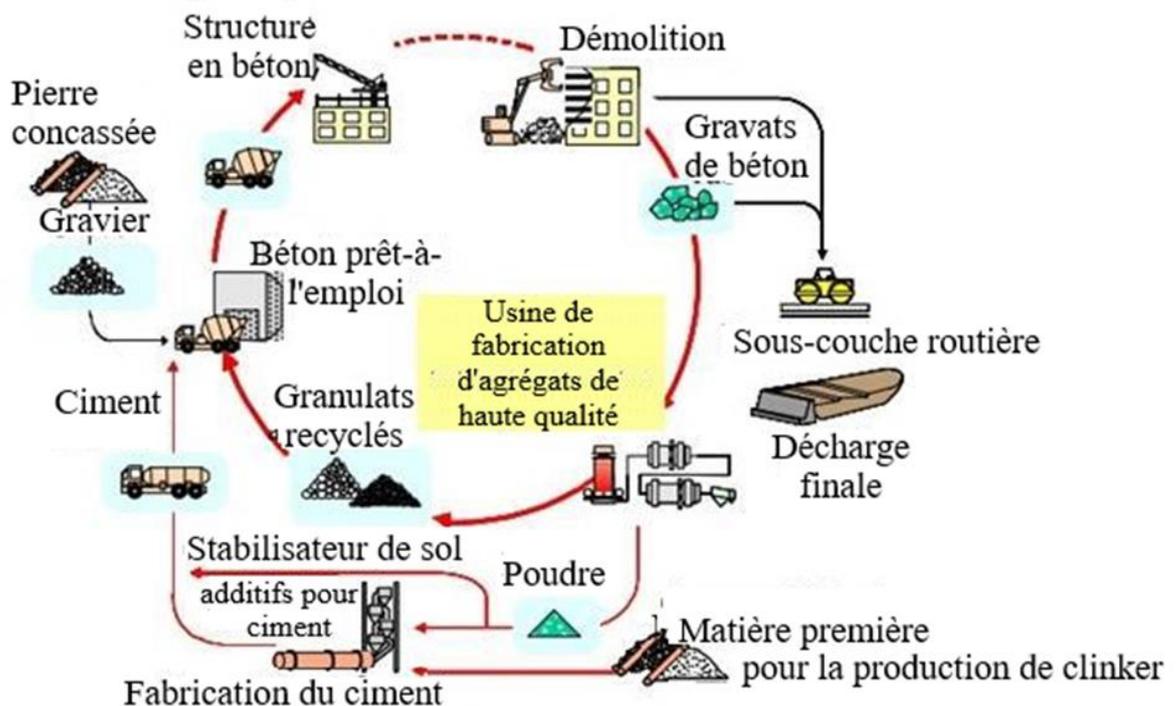


Figure I.2. Schéma du processus de recyclage du béton. (Source : [Shima et al., 2005])

I.1.2. Granulats de béton recyclé

La plus répandue des techniques utilisées pour le recycle des déchets de béton démolie consiste à le réutiliser comme granulat dans un nouveau mix de béton [Gastaldi et al., 2015], où le béton de démolition est généralement soumis à plusieurs étapes de concassage et de broyage, puis tamisé en fractions. En général, deux catégories courantes de granulats recyclés sont produites et classées en fonction de leur granulométrie. La première correspond aux granulats grossiers, dont une partie peut être réutilisée dans le béton neuf ou comme matériau de base pour les routes. La seconde regroupe les granulats fins ou le mortier recyclé issu des déchets de béton concassé, dont la taille est inférieure à 5 mm [Shui et al., 2008].

Les granulats de béton recyclés présentent une qualité inférieure à celle des granulats naturels en raison de la présence de pâte de ciment adhérente, ce qui se traduit par une densité plus faible, une absorption plus élevée, ainsi qu'une usure par abrasion et une teneur en sulfates plus élevée [de Juan et Gutiérrez, 2009], [Gastaldi et al., 2015]. Ces caractéristiques des granulats ont un impact négatif sur la qualité du béton recyclé, affectant principalement les propriétés liées à la déformation (élasticité, retrait et fluage), ainsi que la durabilité et la résistance mécanique [Shi et al., 2016], [de Juan et Gutiérrez, 2009], [Fatemi et Imaninasab, 2016].

Afin d'améliorer la qualité des granulats recyclés, plusieurs études ont exploré des méthodes visant à éliminer le maximum de pâte de ciment adhérente sans altérer l'intégrité des granulats [Kim et al., 2017], [Tam et al., 2007], [Carriço et al., 2021]. Certaines recherches ont trouvé qu'une teneur en mortier adhérent inférieure à 44 % en poids permet d'obtenir des granulats recyclés suffisamment performants pour une utilisation en béton de structure [de Juan et Gutiérrez, 2009]. La réduction de la teneur en mortier adhérent entraîne une augmentation de la proportion de granulats fins, représentant environ 50 % du poids des déchets de béton concassé [Schoon et al., 2015]. La fraction fine des déchets de béton est constituée d'un mélange de résidus de granulats grossiers et fins, ainsi que d'une quantité très élevée de fines (<63 μm), principalement composées de pâte de ciment hydratée [Kwon et al., 2015]. En raison de sa forte demande en eau, cette fraction est moins adaptée à la production de béton structurel, car elle entraîne une réduction de la résistance mécanique et de la durabilité du béton par rapport à ceux contenant du sable naturel [Zhao et al., 2015], [Khatib, 2005].

I.1.3. Pâte de ciment hydratée

Le concassage du béton recyclé pour la production de granulats recyclés génère environ 25 % de déchets sous forme de fines poudres de béton, principalement constituées de pâte de ciment hydratée (PCH) [Serpell et Lopez, 2013]. Grâce à sa composition chimique, il peut être utilisé comme :

❖ Matière première pour la production de clinker

Plusieurs recherches ont été menées pour l'utilisation de la PCH comme matière première dans la production de clinker, en remplacement des minéraux naturels extraits des carrières, afin de limiter la consommation de ressources naturelles [Dan et Wang, 2006], [Ai et al., 2011], [Schoon et al., 2015], [Gastaldi et al., 2015], [Shin et al., 2025]. Ai et al. [Ai et al., 2011] ont démontré qu'il est possible de produire du ciment recyclé à partir de béton de démolition à une température plus faible. Ils ont également confirmé que la résistance à la compression de ce ciment recyclé répond aux exigences du ciment Portland ordinaire. Schoon et al. [Schoon et al., 2015] ont constaté que l'utilisation de fines recyclées comme matière première alternative n'affecte pas significativement la minéralogie du clinker final. Toutefois, une phase d'homogénéisation adaptée aux variations chimiques de ces fines est essentielle. Leur étude a également montré que plus les fines sont finement séparées de la fraction sableuse, plus elles conviennent à la production de clinker Portland. Gastaldi et al. [Gastaldi

et al., 2015] ont démontré que le remplacement de 30% des matières premières naturelles par des déchets de ciment hydraté permet de produire un clinker dont la composition minéralogique est proche de celle d'un clinker de référence, tout en réduisant les émissions de CO₂ issues de la décarbonatation. Toutefois, lorsque la proportion des déchets est plus élevée, le clinker obtenu est riche en C₂S et ne contient pas de C₃S, ce qui le rend inadapté à une utilisation seul comme clinker.

❖ Substituant de ciment

Les déchets de la PCH peuvent être recyclés soit en tant que matériaux cimentaires supplémentaires, soit en tant que ciment recyclé après la réactivation de leurs propriétés cimentaires par déshydratation. Un certain nombre d'études ont examiné l'exploitation de la poudre de béton recyclé en tant que matériau cimentaire [Kim *et al.*, 2012], [Moon *et al.*, 2008], [Jaroslav *et al.*, 2017], [Kwon *et al.*, 2015], [Xi Chen *et al.*, 2021]. Kim *et al.* [Kim *et al.*, 2012] ont démontré que le mortier à base de la PCH présente une faible résistance à la compression et une maniabilité insuffisante (Figure I.3). Jaroslav *et al.* [Jaroslav *et al.*, 2017] ont observé que avec le remplacement de 5 % du ciment par de la PCH, la résistance à la compression augmentait d'environ 10 %, probablement en raison de sa réactivité et de ses propriétés de micro-filler. En revanche, avec un remplacement de 25 %, un retrait plus important que celui observé pour une pâte ne contenant que du ciment a été constaté.

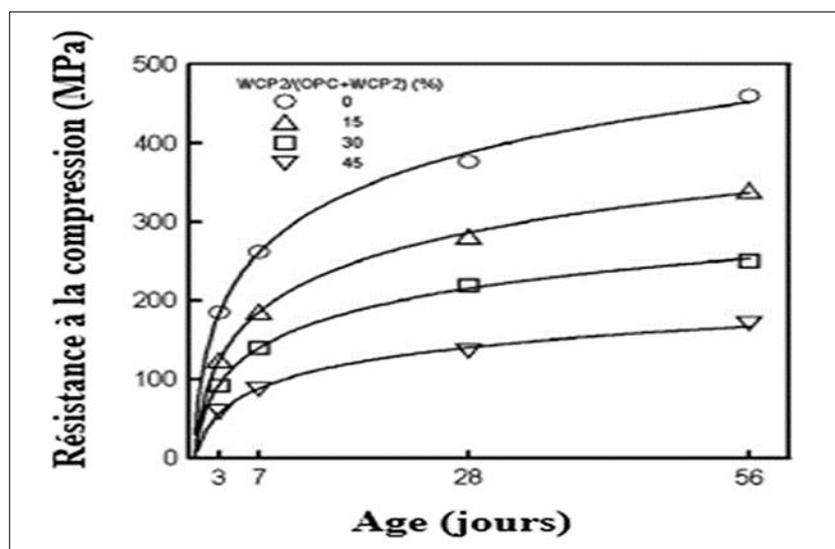


Figure I.3. Résistance à la compression des mortiers contenant du PCH. (Source : [Kim *et al.*, 2012])

Kwon et al. [Kwon et al., 2015] ont montré que les performances globales de la PCH peuvent atteindre 80 % ou plus de celles du ciment, tout en réduisant les émissions de carbone de 46 %. De plus, l'incorporation la PCH a entraîné une légère diminution de la fluidité, tout en restant conforme aux exigences du ciment Portland ordinaire (Figure I.4). De plus, pour obtenir un ciment recyclé de haute qualité, me pourcentage de remplacement de la PCH doit être maintenue en dessous de 30 % [Kwon et al., 2015], [Ma et al., 2019]. Chen et al. [Xi Chen et al., 2021] montre que l'augmentation de la teneur en RCP réduit la libération de chaleur d'hydratation, accroît la porosité et diminue la fluidité ainsi que la résistance du mortier. Cependant, lorsque la teneur en RCP est inférieure à 20 %, son impact sur la résistance mécanique reste faible et l'ajout de cendres volantes et de fumée de silice améliore la fluidité et réduit la proportion de pores nuisibles. Bordy et al. [Bordy et al., 2017] ont conclu que la PCH ne génère pas d'effet filler et son impact sur l'hydratation et la résistance mécanique reste limité par rapport au ciment remplacé. Les résultats de Zhu et al. [Zhu et al., 2018] montrent que la PCH soumise à la carbonatation peut retrouver ses propriétés cimentaires et développer une résistance élevée. Lu et al. [Lu et al., 2018] ont constaté que le remplacement du ciment par 10 à 20 % de la PCH carbonatée améliore la résistance tout en réduisant la porosité pour une teneur de 20 % par rapport au ciment Portland.

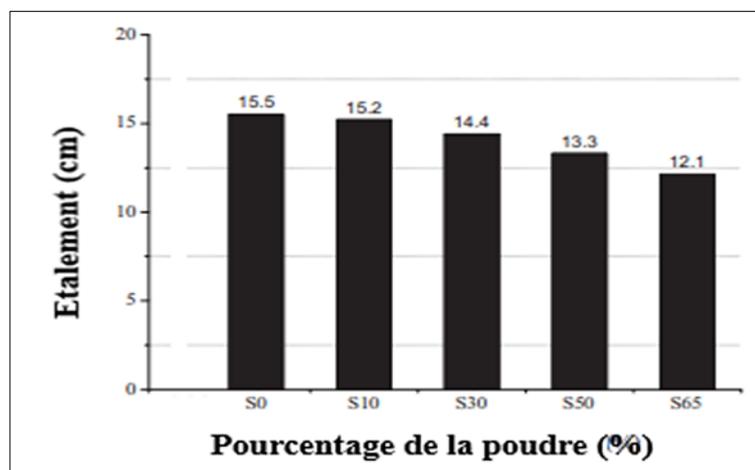


Figure I.4. Valeurs d'étalement en fonction de pourcentage de PCH. (Source [Kwon et al., 2015])

I.2. Réactivation de la pâte de ciment hydraté par traitement thermique

Un certain nombre d'études antérieures ont examiné la réactivation de la PCH par traitement thermique afin de produire un ciment recyclé. La plupart de ces études ont étudié la

PCH fabriquée en laboratoire, plutôt qu'une pâte séparée à partir de béton démolé, ce qui a permis de mieux comprendre le rôle réel de cette pâte lorsqu'elle est utilisée comme addition minérale, en particulier le rôle de sa phase anhydre résiduelle. La réversibilité de la réaction d'hydratation avait déjà été observée depuis longtemps dans des études portant sur le comportement du béton endommagé après incendie [Poon *et al.*, 2001], où la récupération partielle de la résistance observée après reprise d'humidité par l'eau d'extinction [Serpell *et Lopez*, 2013].

L'activation thermique des matériaux cimentaires consiste à inverser le processus d'hydratation du ciment par un traitement thermique, permettant de restaurer la composition des phases non hydratées [Splittgerber *et Mueller*, 2003]. Le ciment Portland est principalement composé de silicates de calcium (C_3S et C_2S) et de composés de type aluminates de calcium (C_3A , C_4AF). Les principaux produits d'hydratation du ciment Portland ordinaire sont le C-S-H, la portlandite (CH), l'ettringite et les monosulfoaluminates de calcium [Taylor, 1997]. Ces composés peuvent se déshydrater et se décomposer à des températures élevées, tout en retrouvant leurs propriétés hydrauliques lors de la réhydratation. La nature et la quantité des produits déshydratés obtenus durant le traitement thermique dépendent étroitement de la température traitement [Carriço *et al.*, 2020a]. Les réactions de déshydratation impliquent la perte d'eau liée chimiquement, d'eau interfeuillet, d'eau capillaire et d'eau adsorbée [Fordham *et Smalley*, 1985]. Il est à noter que les températures de l'activation thermique de l'PCH restent bien inférieures à celle de nécessaire pour la fabrication de ciment normale (1450 °C), c'est qui peut limiter l'émission de CO_2 liée à la production du ciment [Carriço *et al.*, 2020a]. De plus, le processus de déshydratation constitue une alternative intéressante pour le recyclage des matériaux cimentaires issus des granulats recyclés (PCH) et des eaux de lavage et des bétons refusés dans les centrales à béton [Serpell *et Lopez*, 2013].

De nombreuses recherches ont proposé des méthodes exploitant la capacité de réhydratation des matériaux cimentaires. Comme illustré sur la Figure I.5, le principe repose essentiellement sur la séparation de la fraction cimentaire des autres déchets de béton, son broyage en une poudre fine, puis sa déshydratation à haute température afin de restaurer son aptitude à l'hydratation [Carriço *et al.*, 2020a] :

La première étape consiste à extraire la fraction cimentaire à partir des déchets de béton, dont les composants sont fortement adhérents les uns aux autres, ce qui rend leur séparation difficile.

L'étape de broyage de la PCH présente également plusieurs difficultés, telles que l'agglomération des particules et l'adhérence aux parois du moulin. Pour atténuer ces problèmes, un traitement à basse température est parfois appliqué avant le broyage, ou bien le broyage est effectué après l'activation thermique. Le broyage augmente la finesse et la surface spécifique du ciment recyclé, ce qui améliore sa réactivité, son taux d'hydratation, le développement de sa résistance. La réduction de la taille des particules diminue également les gros pores et l'absorption capillaire. Les particules de ciment traité sont généralement de taille inférieure à 150 µm dans la plupart des études, bien qu'atteindre des tailles similaires à celles du ciment Portland ordinaire reste très difficile.

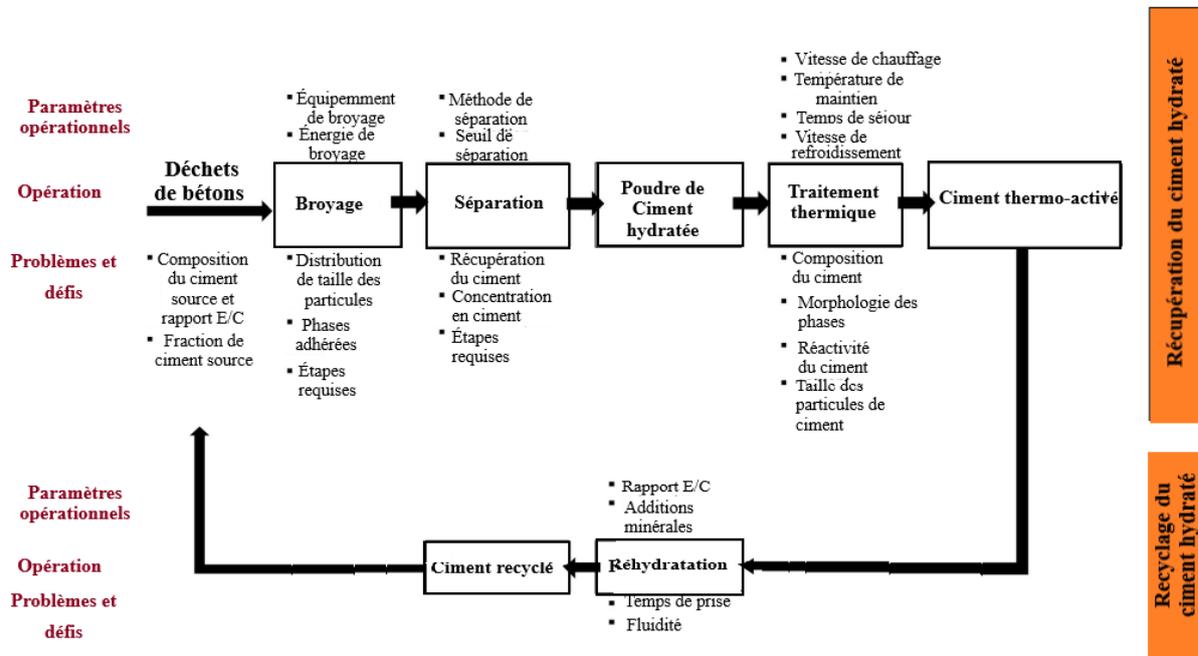


Figure I.5. Matériaux cimentaires recyclés par thermoactivation. (Source [Carriço et al., 2020a])

Le traitement thermique comprend généralement trois étapes principales : Chauffage qui est choisi généralement pour être entre 5 °C/min à 10 °C/min, cuisson à une température d'activation et pendant un temps de séjour spécifiques, puis le refroidissement. Une vitesse de chauffage plus faible est préférée, car il offre des conditions plus adaptées pour une déshydratation complète. L'extension complète du processus de déshydratation dépend de la température d'activation et du temps de séjour. Des températures d'activation comprises entre environ 500 °C et 800 °C sont récemment adoptées. Le temps de séjour à la température

d'activation permet aux réactions de se dérouler correctement, et la plupart des études adoptent un temps de séjour de 2 à 3 heures.

Lorsque la PCH est préparée par ciment Portland ordinaire, l'activation thermique rend la surface des particules de ciment rugueuse, sa structure plus lâche. La surface spécifique de ces ciments réactivés est augmentée jusqu'à 15 fois par rapport de celle des particules de ciment normal. En fonction principalement de la température d'activation thermique, la densité des particules est trouvée comprise entre 2650 kg/m^3 et 2950 kg/m^3 , ce qui est inférieur à celle des particules de ciment normal ($\sim 3150 \text{ kg/m}^3$). Cependant, la composition chimique élémentaire du ciment traité reste généralement inchangée après l'activation thermique.

I.2.1. Produits déshydratés issus du ciment thermo-activé

En comparaison avec ciment normal, la composition du ciment déshydraté se caractérise généralement par des quantités plus élevées de chaux libre et de l'absence de silicates tricalciques [Bogas *et al.*, 2019]. En fonction de température d'activation, du cycle thermique (temps de séjour et vitesse de chauffage et de refroidissement) et de la composition du ciment initial, la pâte de ciment déshydratée peut avoir une composition très complexe, comprenant des particules partiellement déshydratées, des hydrates résiduels et des particules de ciment anhydre qui ne se sont jamais complètement hydratées dans le matériau initial [Shui *et al.*, 2009], [Carriço *et al.*, 2020a].

Shui *et al.* [Shui *et al.*, 2008] ont étudié la PCH obtenue par un léger broyage et tamisage de la fraction fine des granulats de béton recyclé à travers un tamis de $75 \mu\text{m}$, après des traitements thermiques réalisés à $200 \text{ }^\circ\text{C}$, $500 \text{ }^\circ\text{C}$ et $800 \text{ }^\circ\text{C}$. Les résultats montrent que la PCH déshydratée est constituée de formes déshydratées et transformées des produits d'hydratation initiaux. Les principales phases cristallines identifiées dans la PCH déshydratée sont le C-S-H, la larnite (C_2S), la portlandite (CH), l'étringite, le carbonate de calcium (CaCO_3) et l'oxyde de calcium (CaO). La décomposition thermique de l'étringite est commencée à partir de $200 \text{ }^\circ\text{C}$, le gel C-S-H commence à se décomposer autour de $500 \text{ }^\circ\text{C}$. Au-delà de cette température, la portlandite (CH) subit une déshydroxylation, menant progressivement à la formation d'oxyde de calcium (CaO). Lorsque la température dépasse $800 \text{ }^\circ\text{C}$, la transformation de la portlandite en CaO est trouvée complète [Shui *et al.*, 2008]. En comparaison, Zhutovsky et Shishkin [Zhutovsky *et shishkin*, 2021] rapportent une décomposition de l'étringite à des températures plus basses (juste au-dessus de $100 \text{ }^\circ\text{C}$), le gel C-S-H à se décomposer au-delà de $600 \text{ }^\circ\text{C}$ et la portlandite entre 400 et $500 \text{ }^\circ\text{C}$.

Wang et al. [Wang et al., 2018] ont étudié la production de ciment recyclé en soumettant une pâte de ciment durcie depuis deux ans à un traitement thermique à quatre températures différentes : 120 °C, 450 °C, 750 °C et 1150 °C. L'analyse a révélé que la pâte de ciment initiale était carbonatée. Ainsi, lorsque la température de déshydratation a atteint 450 °C, une augmentation de la formation de CaCO_3 a été observée. À des températures plus élevées (750 °C et 1100 °C), une quantité importante de CaO a été observée, résultant de la décomposition du CaCO_3 et du $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Ils ont rapporté qu'à 450 °C, l'élimination complète des molécules d'eau interfeuillettes de C-S-H se produit. Lorsque la température atteint 750 °C et 1100 °C, les structures du C-S-H sont détruites, ce qui conduit à la formation de nouvelles phases cristallines : la wollastonite (CS) et une petite quantité de larnite (C_2S). Serpell et Lopez [Serpell et Lopez, 2015] ont rapporté l'augmentation de formation de $\beta\text{-C}_2\text{S}$ et de CaO dans les pâtes de ciment déshydratées à des températures supérieures à 800 °C. Zhutovsky et Shishkin [Zhutovsky et Shishkin, 2021] ont observé la formation de C_2S et de la chaux à la suite de la décomposition de la portlandite et du gel cimentaire. Le C_3S a commencé à se former à une température d'environ 1250 °C, ce qui s'est accompagné d'une diminution de la teneur en C_2S et en chaux.

I.2.2. Propriétés physiques des matériaux cimentaires contenant du ciment déshydraté

✚ Demande en eau et maniabilité

Les PCH thermo-activées nécessitent généralement un rapport E/C plus élevé que le ciment Portland ordinaire pour obtenir la même consistance, en raison de leur grande surface spécifique et de la structure poreuse des composés déshydratés, ainsi que de la quantité importante de CaO libre formée lors du traitement thermique [Serpell et Lopez, 2015], [Shui et al., 2009], [Xuan et Shui, 2010], [Yu et Shui, 2013].

Shui et al. [Shui et al., 2009] ont étudié des poudres de ciment déshydratées obtenues par préchauffage de la PCH âgées de 30 jours à différentes températures comprises entre 300 °C et 900 °C. Ils ont constaté que la quantité d'eau nécessaire pour obtenir une consistance standard augmentait progressivement avec l'augmentation de la température de traitement du ciment (Figure I.6). Cette augmentation a été expliquée par la production croissante de produits de déshydratation liée à l'augmentation de la température d'activation thermique, ainsi que par la présence des quantités élevées de CaO. Yu et Shui [Yu et Shui, 2013] ont expliqué que les particules de ciment déshydraté ont une forte tendance à s'agglomérer,

principalement en raison de leur grande surface spécifique. Cela entraîne une augmentation de la quantité d'eau de gâchage piégée entre les particules, ce qui réduit la quantité d'eau disponible pour l'écoulement et augmente ainsi la demande en eau du ciment traité. Un rapport E/C élevée est par conséquent nécessaire dans les pâtes et mortiers contenant du ciment thermoactivé, ce qui entraîne inévitablement une diminution de leur résistance à la compression. Carriço et al. [Carriço et al., 2020b] ont aussi observé que la quantité d'eau nécessaire pour atteindre la consistance normale augmentait avec le pourcentage de ciment thermoactivé incorporé, ainsi qu'avec l'élévation de la température de traitement. L'utilisation d'un superplastifiants est donc nécessaire pour maîtriser efficacement le rapport E/C des mélanges incorporant de ciment thermoactivé [Carriço et al., 2020a].

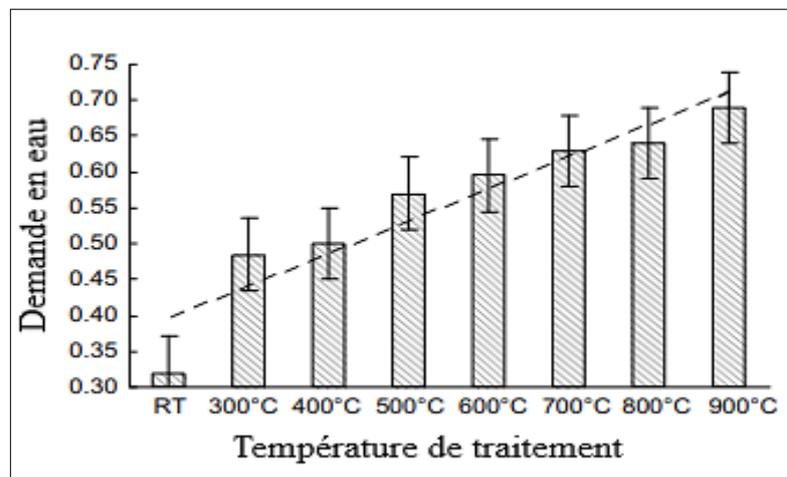


Figure I.6. Demande en eau des poudres de ciment déshydratées en fonction de la température de déshydrations. (Source [Shui et al., 2009])

✚ Temps de prise

De nombreuses études ont rapporté que les ciments thermoactive présentent un temps de prise plus rapide que le ciment Portland normal [Shui et al., 2009], [Bogas et al., 2019], [Xuan et Shui, 2010], [Yu et Shui, 2013], ce qui peut agir défavorablement sur les propriétés à l'état frais des matériaux cimentaires et à leurs performances mécaniques à long terme. Cette diminution de temps de prise peut être expliquée par la réaction rapide des composés partiellement déshydratés, en parallèle avec l'hydratation rapide du CaO. Shui et al. [Shui et al., 2009] ont observé une diminution parabolique du temps de prise à mesure que la température de déshydratation de la PCH augmentait (Figure I.7). Ils ont suggéré que, lors du contact avec l'eau, les phases déshydratées réagissent rapidement pour former un nouveau

réseau C-S-H, sans avoir besoin de dissolution et de nucléation, ce qui explique le comportement de prise rapide observé. Par contre, Carriço et al. [Carriço et al., 2020b] ont rapporté l'augmentation de temps de prise avec l'augmentation de la température de traitement. Xuan et Shui [Xuan et Shui, 2010] ont montré que le temps de prise des pâtes de ciment thermoactivées diminue avec l'augmentation du rapport E/C du matériau initial, en raison du contenu plus élevé en phases déshydratées. Yu et Shui [Yu et Shui, 2013] ont également observé la diminution du temps de prise avec l'augmentation de la quantité de pâtes de ciment déshydratées.

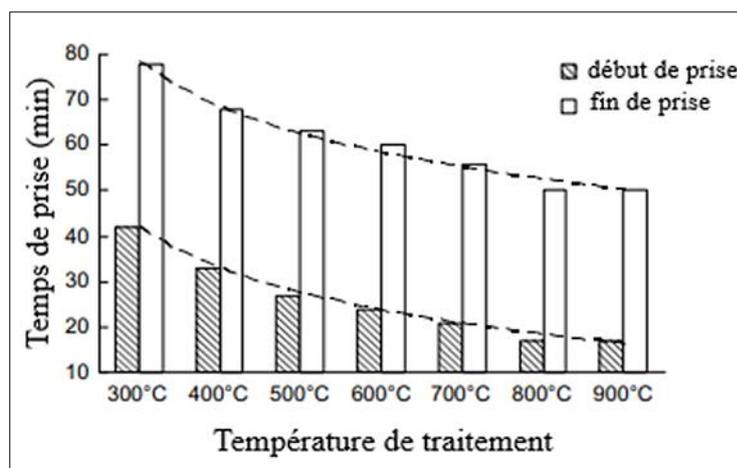


Figure I.7. Temps de prise des poudres de ciment déshydratées en fonction de la température de déshydrations. (Source [Shui et al., 2009])

I.2.3. Propriété mécanique et microstructure des matériaux cimentaires contenant du ciment déshydraté

Les propriétés mécaniques des pâtes et mortiers à base de ciment thermoactivé ont été étudiés pour des mélanges incorporant ce liant en remplacement total ou partiel du ciment ordinaire, avec différents rapports E/C. Ces propriétés dépendent de plusieurs facteurs tels que le matériau initial, la température de traitement, la finesse des particules et le rapport eau/ciment [Carriço et al., 2020a]. Shui et al. [Shui et al., 2008] ont étudié la résistance à la compression du ciment déshydraté après traitement thermique à 500 °C. La résistance à la compression a atteint 8.2 MPa à 7 jours et 8.3 MPa à 28 jours, démontrant que le ciment déshydraté peut être réhydraté avec succès. Cependant, la microstructure des produits de

réhydratation était plus lâche que celle de la pâte de ciment ordinaire et présente par conséquent des performances inférieures à celles du ciment ordinaire.

Bogas et al. [Bogas et al., 2019] ont étudié l'effet des ciments recyclés, produit par activation thermique de déchets de béton (RCC) et de pâte de ciment (RCP), sur la résistance mécanique des mortiers. L'influence de pourcentage de remplacement (25 %, 50 %, 75 % et 100 %), de la température de traitement (20, 350 et 650 °C) et de la finesse des grains de ciment recyclé a été analysée. Les résultats montrent une forte réduction des résistances en compression et en flexion avec l'augmentation du taux de remplacement du ciment Portland ordinaire (OPC) par le ciment recyclé (RCC). Ils ont attribué cette forte réduction de résistance à la quantité faible des composés réhydratables et que la présence de forte teneur d'agrégats dans le ciment recyclé. Les résistances obtenues dans les mortiers contenant du RCP étaient supérieures à celui observées dans les mortiers contenant du RCC, en raison de la plus grande quantité de ciment présente dans ces mélanges. Cependant, comme montre la Figure I.8, les résistances à la compression et à la flexion des mortiers contenant du RCP restent largement inférieures à celles du mortier témoin, avec une diminution de l'ordre de 85 à 90 %.

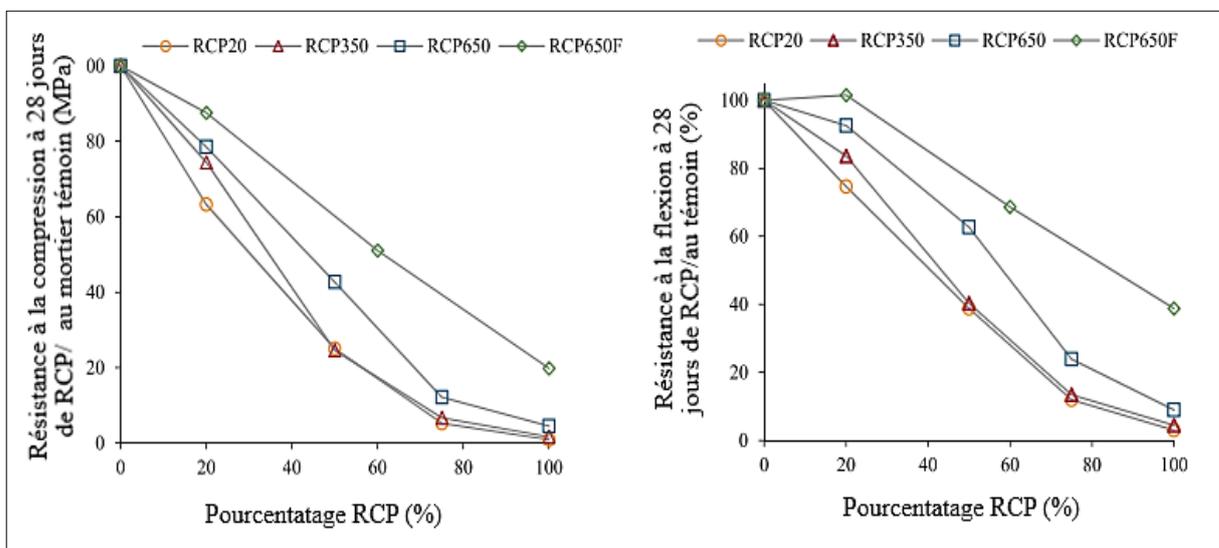


Figure I.8. Variations des résistances mécaniques des mortiers recyclés par rapport au mortier de référence en fonction de pourcentage de remplacement. (Source [Bogas et al., 2019])

Bogas et al. [Bogas et al., 2019] ont constaté que la capacité de réhydratation du ciment recyclé était améliorée par l'augmentation de sa finesse ($< 63 \mu\text{m}$) et de la température de préchauffage (mortier RCP650F). Les mortiers contenant 100 % de RCPF ont développé des

résistances mécaniques environ 39 % et 20 % de la résistance à la flexion et à la compression des mortiers de référence, respectivement. Ces valeurs sont jusqu'à 4.5 fois supérieures à celles des mortiers avec RCP plus grossiers. De plus, pour des taux de remplacement allant jusqu'à 20 % de RCPF, la résistance mécanique n'a pas été significativement affectée.

En revanche, Wang et al. [Wang et al., 2018] ont constaté que les PCH réhydratées composées des particules plus grosse (300 μm) présentent des résistances à la compression légèrement supérieures à celles obtenues avec le PCH réhydraté composées des particules plus fines (150 μm), tout en maintenant un rapport E/C identique dans les deux ménages. En effet, plusieurs auteurs soulignent que les particules fines de ciment thermoactivé ont tendance à s'agglomérer à différentes étapes du processus de transformation, ce qui pourrait expliquer ces résultats contradictoires [Carriço et al., 2020a]. Yu et Shui [Yu et Shui, 2013] ont étudié la dispersion des particules de PCH réhydratées et trouve que l'hydratation du ciment est favorisé.

Les résultats expérimentaux montrent que la capacité de réhydratation du la PCH dépend fortement de la température de déshydratation. Certains recherches [Wang et al., 2018] ont obtenu une résistance à la compression maximale pour des ciments traités à 500 °C et moins, tandis que d'autres [Shui et al., 2009], [Shui et al., 2008] [Xuan et Shui, 2010] ont observé que les valeurs maximales de résistance à la compression sont obtenues pour des températures de traitement comprises entre 600 °C et 800 °C. Shui et al. [Shui et al., 2009] ont constaté que les PCH déshydratées à 800 °C présentent les résistances à la compression maximales, aussi bien aux jeunes âges qu'après 28 jours de cure (la Figure I.9). Ils trouvent que, par rapport à la PCH d'origine, le développement de la résistance du PCH déshydratée est plus rapide aux jeunes âges. En revanche, à 28 jours, l'évolution de la résistance à la compression est inversée. Par exemple, les résistances à la compression de la PCH d'origine et celle déshydratée à 800 °C sont presque équivalentes à 3 et 7 jours, tandis qu'à 28 jours, la résistance de la PCH déshydratée n'atteint que 60 % de celle de la PCH d'origine, ce qui montre que la résistance du PCH déshydratée ne peut pas retrouver son état initial.

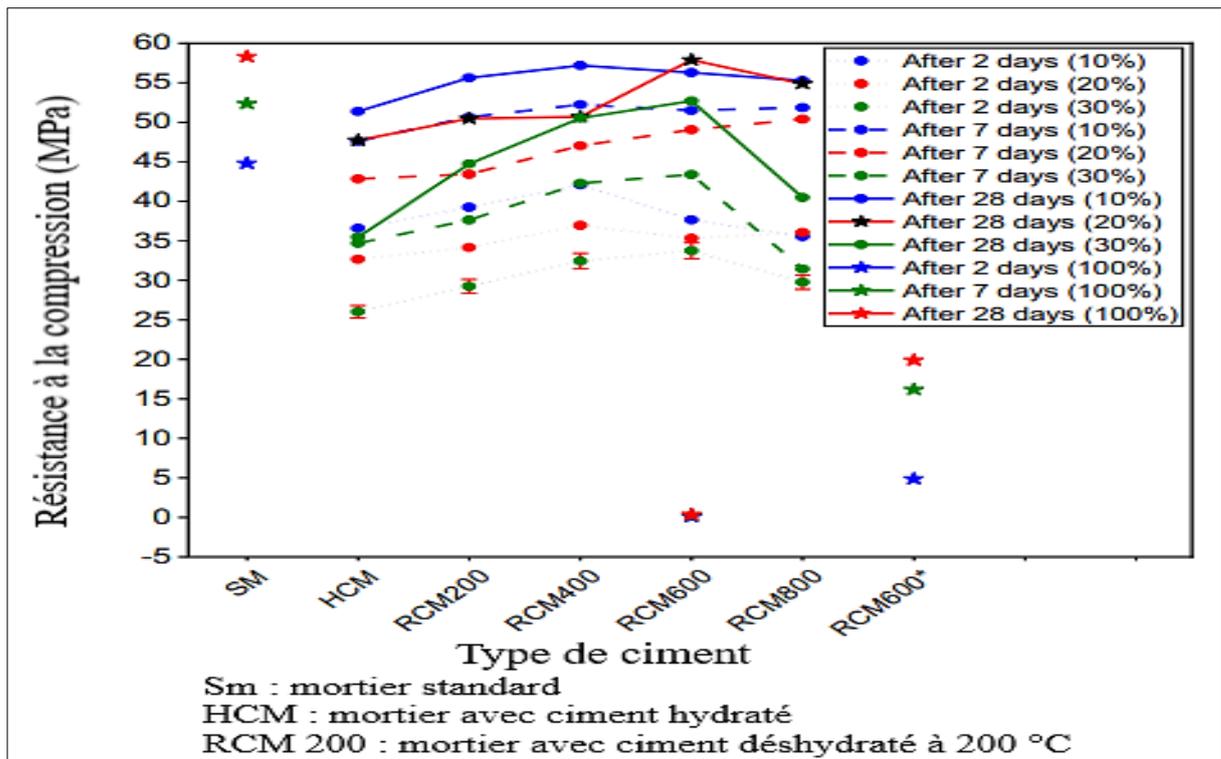


Figure I.9. Variations de la résistance à la compression des poudres de ciment déshydratées en fonction de la température de déshydrations. (Source [Shui et al., 2009])

Semugaza et al. [Sumugaza et al., 2023] ont constaté que le mortier contenant 20% de ciment réhydraté, traité à 600 °C, présente les meilleures résistances à la compression à 28, atteignant 99.3 % de la résistance du mortier témoin (Figure I.10). Ils ont également préparé des éprouvettes de mortier avec 100 % de ciment réhydraté traité à 600 °C, en utilisant un superplastifiant afin de faciliter la mise en œuvre. Après 28 jours de cure, la résistance à la compression du mortier atteint 34 % de celle du mortier témoin, tandis que sa résistance à la flexion représente 45 % de celle du mortier témoin.

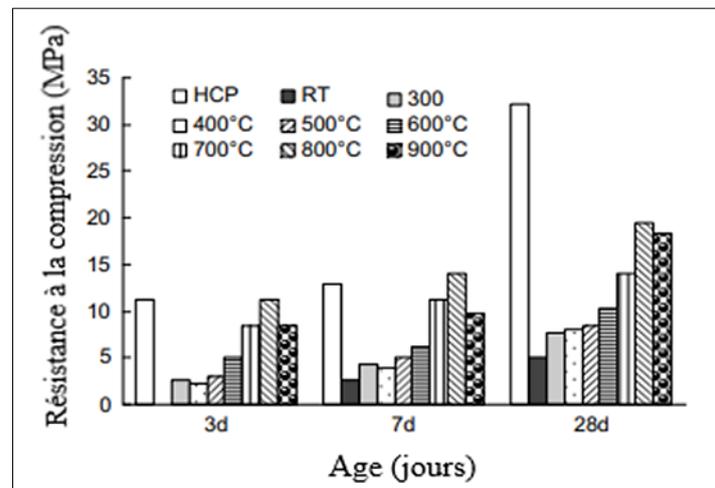


Figure I.10. Comparaisons des résistances à compression des mortiers contenant différents types de ciment recyclé. (Source [Sumugaza et al., 2023])

Wang et al. [Wang et al., 2018] ont rapporté que la résistance à la compression maximale du PCH déshydratée est obtenue à une température de 450 °C, une observation également confirmé par [He et al, 2019]. Cependant, les recherches montrent que les PCH déshydratées à des températures supérieures à 800 °C contiennent moins de phases réactives, ce qui entraîne une résistance mécanique plus faible [Wang et al., 2018], [Shui et al., 2009], [Serpell et lopez, 2015] , [He et al, 2019].

Bogas et al. [Bogas et al., 2020] ont rapporté que la résistance mécanique de la pâte de ciment réactivé (RC), préparée à partir d'une poudre tamisée à 250 µm et traitée thermiquement à 700 °C, était comparable à celle d'une pâte de ciment Portland (OPC) ayant le même rapport E/C jusqu'à 3 jours. Cependant, après 28 jours, la résistance à la compression était 32 % inférieure. Sur la base de différents analyses, ils ont conclu que la pâte de ciment réactivé (RC) durcie présente une plus grande quantité de produits d'hydratation, une surface spécifique plus élevée et une porosité plus fine que celle du ciment Portland classique (OPC) à rapport eau/liant équivalent, surtout aux jeunes âges. Comme illustré sur la (Figure I.11), jusqu'à 3 jours, la porosité de RC était légèrement inférieure, mais cette tendance s'est inversée ensuite. Entre 24 h et 28 jours, la porosité totale de la pâte RC a diminué de 41 %, bien que cette réduction soit moins marquée entre 3 et 28 jours comparée à celle de l'OPC. Cela suggère une formation plus rapide mais moins dense du C-S-H dans la pâte RC. Dans tous les cas, cette étude a confirmé l'hydratation progresse avec le temps de

RC, entraînant une augmentation des produits hydratés (C-S-H et CH) et une diminution des pores et composés anhydres.

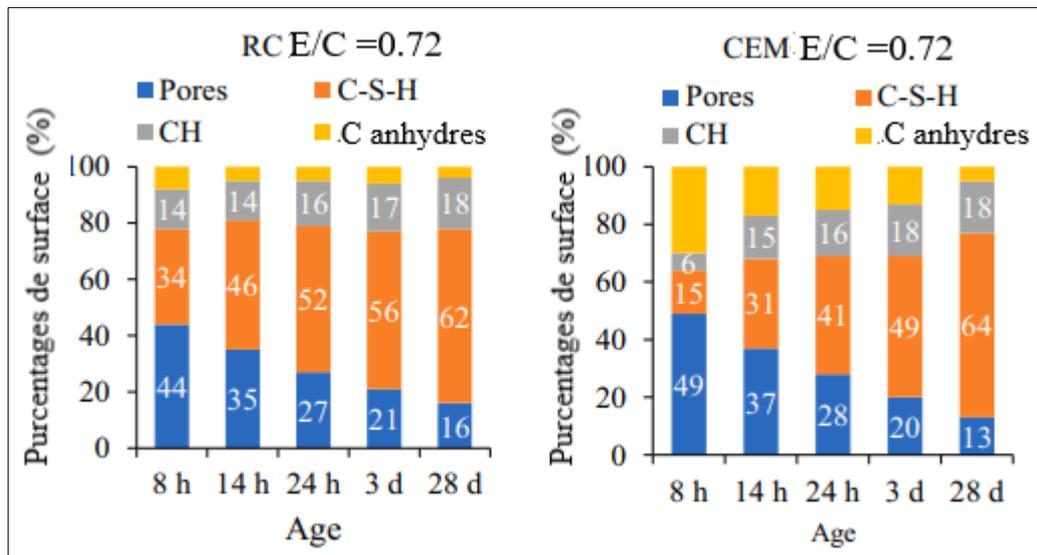


Figure I.11. Pourcentage de surface pour chaque phases : pores, C-S—H, CH et produits anhydres. (Source : [Bogas *et al.*, 2020])

Xuan et Shui [Xuan *et Shui*, 2010] ont montré que la résistance mécanique de la PCH déshydratée dépend non seulement de la température de traitement, mais aussi du rapport E/C de la pâte d'origine. Ils ont constaté que les PCH déshydratées à la même température présentent des résistances à la compression plus élevées lorsque le rapport E/C de la pâte initiale est de 0,3 par rapport à 0,5. Ils expliquent que les pâtes initialement hydratées avec un faible rapport E/C contiennent généralement plus de particules non hydratées, qui peuvent poursuivre leur hydratation en parallèle avec les particules déshydratées, conduisant ainsi à une résistance à la compression plus élevée.

I.3. Recyclage de ciment préhydraté

Lorsque le ciment n'est pas utilisé au cours de délai de stockage prévue ou lorsqu'il est mal conservé ou stocké en grande quantité, il devient sensible à l'humidité, ce qui entraîne une préhydratation [Meddah et al., 2022]. Cela entraîne la formation de grumeaux et le durcissement progressif de ciment ((Figure I.12). La préhydratation de ciment peut survenir durant la production, le transport ou le stockage, et son ampleur dépend de plusieurs facteurs : température, humidité relative, durée d'exposition et finesse des particules [Zghair et al., 2025].



Figure I.12. Déchet de ciment préhydraté. (Source : [Zghair et al., 2025])

Whittaker et al. [Whittaker et al., 2013] ont constaté que les phases sulfatées et aluminates réagissent avec la vapeur d'eau à une humidité relative (HR) de 60 %, tandis que les phases silicates telles que C_3S et C_2S réagissent à une HR de 85 %. Par conséquent, le ciment préhydraté présente généralement une composition minéralogique, une distribution granulométrique et une réactivité spécifiques. Le Tableau I.2 présente les résultats la différence de la composition chimique d'un ciment avant et après exposition à l'humidité. Le Tableau I.3 fournit cette comparaison sous formes de composition minéralogiques.

Les études antérieures sur le ciment préhydraté ont démontré des effets néfastes sur l'hydratation et les propriétés mécaniques. La majorité de ces études ont utilisé soit du ciment préhydraté sans traitement thermique préalable. Certaines recherches ont porté sur l'incorporation de ce ciment seul ([Whittaker et al., 2013], [Meddah et al., 2022]) tandis que d'autres l'ont étudié en combinaison avec des additifs ([Zghair et al., 2025], [Yu et al., 2019]) ou des adjuvants ([Meieal et al., 2017]) pour en améliorer les performances.

Tableau I.2. Composition chimique du ciment avant et après exposition à l'humidité.(Source : [Zghairet *et al.*, 2025])

| Composition chimique | (%) avant exposition | (%) Après exposition |
|--------------------------------|----------------------|----------------------|
| SiO ₂ | 20.44 | 18.6 |
| Al ₂ O ₃ | 5.28 | 4.13 |
| Fe ₂ O ₃ | 4.88 | 4.89 |
| CaO | 61.64 | 60 |
| MgO | 3.9 | 3 |
| SO ₃ | 2.15 | 2.01 |
| Cl | 0.02 | 0.02 |
| Pertes au feu | 2.33 | 4.27 |

Tableau I.3. Composition minéralogique du ciment neuf et du ciment expiré. (Source : [Yu *et al.*, 2019])

| Composition minéralogique | (%) nouveau ciment | (%) ciment expiré |
|---------------------------|--------------------|-------------------|
| C ₃ S | 36.87 | 33.15 |
| C ₃ A | 27.72 | 24.92 |
| C ₄ AF | 12.27 | 11.03 |
| Ca(OH) ₂ | 1.32 | 0 |
| CaCO ₃ | 2.41 | 12.68 |

Les études antérieures sur le ciment préhydraté ont démontré des effets néfastes sur l'hydratation et les propriétés mécaniques. La majorité de ces études ont utilisé soit du ciment préhydraté sans traitement thermique préalable. Certaines recherches ont porté sur l'incorporation de ce ciment seul ([Whittaker *et al.*, 2013], [Meddah *et al.*, 2022]) tandis que d'autres l'ont étudié en combinaison avec des additifs ([Zghair *et al.*, 2025], [Yu *et al.*, 2019]) ou des adjuvants ([Meieal *et al.*, 2017]) pour en améliorer les performances.

Whittaker *et al.* [Whittaker *et al.*, 2013] ont examiné l'effet de différentes conditions de préhydratation (humidité relative) sur les performances mécaniques du ciment. Ils ont constaté qu'une préhydratation à 60 % d'humidité relative avait peu d'effet sur la résistance à la compression, tandis qu'une HR de 85 % entraîne une perte importante de résistance, notamment aux jeunes âges (Figure I.13). Cela est lié à la préhydratation de C₃S, qui commence à hydrater au-dessus de 63 % d'HR, réduisant ainsi la réactivité du ciment recyclé et donc sa résistance. Des pertes de résistance après préhydratation ont été aussi rapportées par Meddah *et al.* [Meddah *et al.*, 2022]. Zghairet *et al.* [Zghairet *et al.*, 2025] ont rapporté que

l'ajout de fumée de silice à une concentration de 10 %, combinée à des microfibres d'acier à 1 % et 2 %, a entraîné une augmentation significative de la résistance à la compression par environ 40 %, 80 % et 97 % respectivement. Yu et al. [Yu et al., 2019] ont également signalé que l'ajout de fumée de silice vieillie le laitier de haut fourneau vieilli au ciment préhydraté ont permis d'obtenir un matériau cimentaire présentant jusqu'à 85 % de l'activité mécanique d'un ciment neuf.

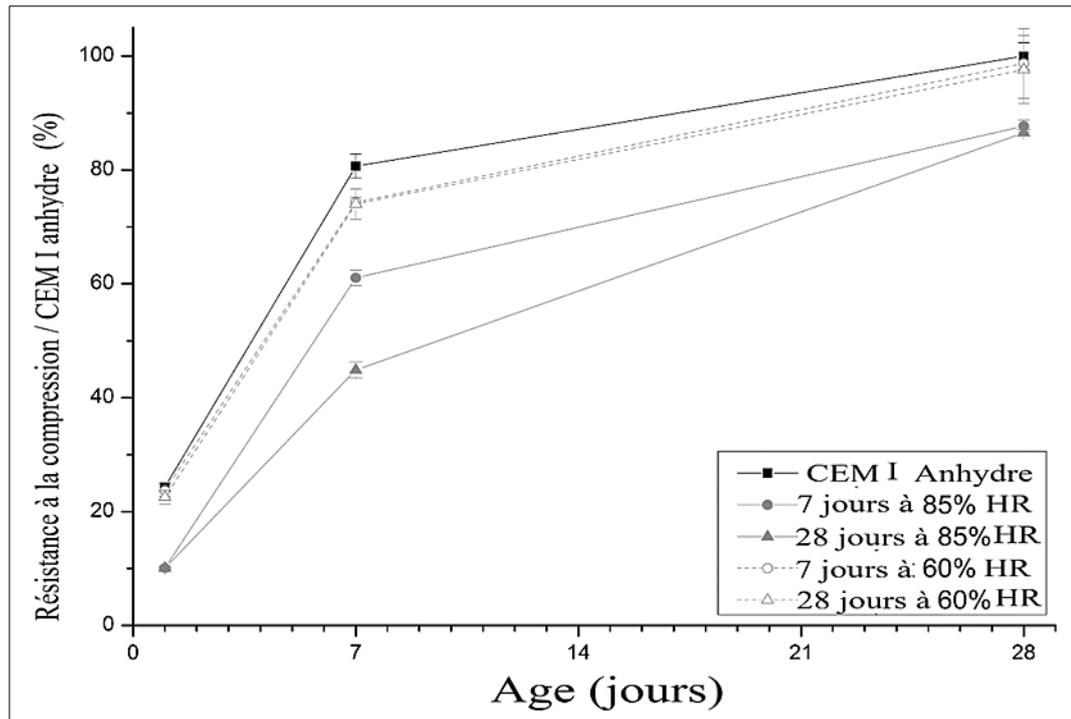


Figure I.13. Evolution de la résistance à compression des mortiers contenant de ciment préhydraté. (Source [Whittaker et al., 2013])

D'autre part, Whittaker et al. [Whittaker et al., 2013] ont constaté que la maniabilité diminuait continuellement avec le prolongement de la préhydratation et que cette diminution est plus sévère à mesure que l'humidité relative augmentait. Cela est expliqué par la formation de produits d'hydratation à la surface des particules de ciment, rendant ces dernières plus rugueuses et favorisant leur enclenchement mutuel. Par conséquent, une plus grande quantité d'eau était nécessaire pour obtenir des pâtes de consistance normale. Cette remarque est aussi signalée par Meddah et al. [Meddah et al., 2022] où la demande en eau augmente avec l'augmentation du pourcentage de ciment expiré (EC) dans le mélange cimentaire (Figure I.14). La préhydratation de ciment a également entraîné des modifications notables sur les temps de prise et la réactivité du ciment. Meddah et al. [Meddah et al., 2022] ont trouvé que

les temps de prise augmentent avec l'augmentation du pourcentage de ciment expiré (EC) dans le mélange. Whittaker et al. [Whittaker et al., 2013] ont observé que l'augmentation des temps de prise est plus important après une préhydratation à 85 % d'humidité relative.

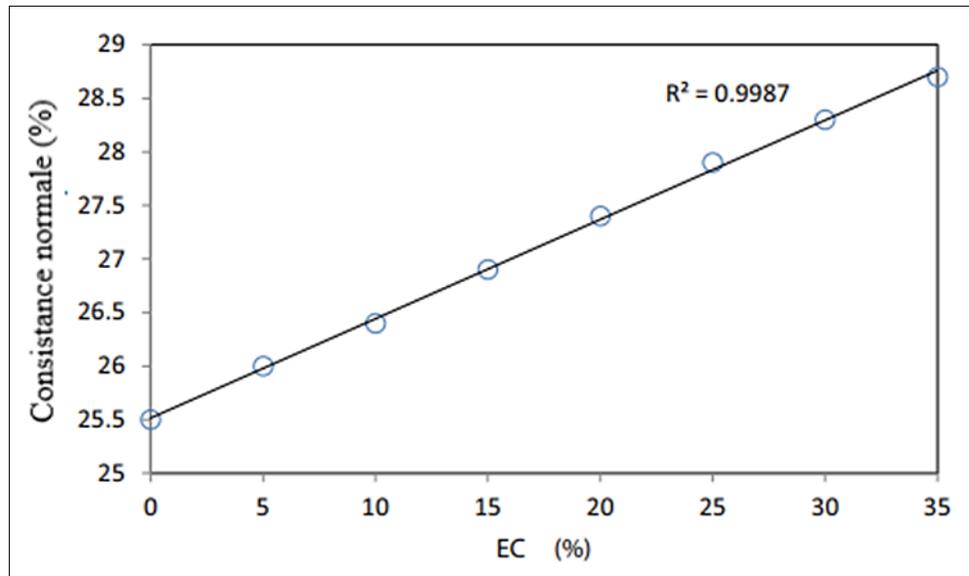


Figure I.14. Relation entre pourcentage de ciment expiré et consistance. (Source [Meddah et al., 2022])

Dans l'ensemble, le ciment préhydraté peut être considéré comme un pâte de ciment hydratée (PCH) similaire à celle issues de déchets de démolition [Yu et al., 2019]

. Selon Bordy et al. [Bordy et al., 2017], la pâte de ciment recyclée contient encore environ 24 % de constituants hydrauliques actifs, une proportion similaire à celle observée dans les poudres provenant de déchets de démolition [Xiao et al., 2018].

Conclusion :

Le recyclage du béton représente aujourd'hui une voie prometteuse pour réduire l'impact environnemental de l'industrie du ciment et du béton. Cette démarche repose essentiellement sur la valorisation des différents constituants du béton démoli, notamment les granulats recyclés et la pâte de ciment hydratée. Cette dernière a attiré un intérêt croissant en raison de son potentiel à être activité après traitement thermique.

Deux principales sources de ciment recyclé sont identifiées : d'une part, les poudres de pâte de ciment issues du recyclage du béton et, d'autre part, le ciment préhydraté provenant de

lots stockés de manière inadéquate. Dans les deux cas, le traitement thermique à haute température permet de restaurer partiellement l'activité hydraulique de ces matériaux, ouvrant la voie à leur utilisation comme liants alternatifs. Plusieurs études ont mis en évidence les effets du traitement thermique sur la structure poreuse, les propriétés mécaniques et la microstructure des matériaux cimentaires contenant du ciment recyclé.

C'est dans cette perspective que s'inscrit notre étude, qui s'intéresse à la valorisation de ciment préhydraté issu d'un mauvais stockage. Contrairement à la majorité des recherches axées sur la pâte de ciment hydratée dérivée de béton de démolition ou sur une pâte de ciment préparée avec un ciment ordinaire (OPC), ce travail explore le recyclage d'un ciment résistant au sulfate et évalue les effets susceptibles sur les propriétés de mortier.

Le prochain chapitre présentera la méthodologie expérimentale adoptée pour évaluer l'effet de ciment recyclée sur les propriétés des mortiers.

Références Bibliographique

- Ai, H., Wei, J., Bai, J., & Lu, P. (2011). Properties of Recycled-Cement Produced from Waste Concrete, *Advanced Materials Research*, 194-196, 1170-1175.
- Bogas, J. A., Carriço, A., & Pereira, M. F. C. (2019). Mechanical characterization of thermal activated low-carbon recycled cement mortars, *Journal of Cleaner Production*, 218, 377– 389.
- Bogas, J.A., Carriço, A., & Tenza-Abril, A.J. (2020). Microstructure of thermoactivated recycled cement pastes, *Cement and Concrete Research*, 138, 1062.
- Bogas, J.A., Carriço, A., & Tenza-Abril, A.J. (2022). The Efficiency of Recycling Expired Cement Waste in Cement Manufacturing: a Sustainable Construction Material, *Circular Economy and Sustainability*, 2, 1213-1224.
- Bordy, A., Younsi, A., Aggoun, S., & Fiorio, B. (2017). Cement substitution by a recycled cement paste fine: role of the residual anhydrous clinker. *Construction and Building Materials*, 132, 1–8.
- Carriço, A., Bogas, J.A., & Guedes, M. (2020a). Thermoactivated cementitious materials - a review, *Construction and Building Materials*, 250, 118873.
- Carriço, A., Real, S., Bogas, J. A., & Pereira, M. F. C. (2020b). Mortars with thermo activated recycled cement: Fresh and mechanical characterisation, *Construction and Building Materials*, 256, 119502.
- Carriço, A., Bogas, J. A., Hu, S., & Rezl, S. (2021). Novel separation process for obtaining recycled cement and high-quality recycled sand from waste hardened concrete *Journal of Cleaner Production*, 309, 127375.
- Chen, K., Wang, J., Yu, B., Wu, H., & Zhang, J. (2021). Critical evaluation of construction and demolition waste and associated environmental impacts: A scientometric analysis, *Journal of Cleaner Production*, 287, 125071.
- Dan, J.-M. & Wang, P.M. (2006). Use of waste mortar as calcined clinker of cement', *Journal of building Materials*, 9 (5), 570-575.
- de Juan, S., M., & Gutiérrez, P. A. (2009). Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregates. *Construction and Building Materials*, 23, 872-877.
- Fatemi, S., & Imaninasab, R. (2016). Performance evaluation of recycled asphalt mixtures by construction and demolition waste materials, *Construction and Building Materials*, 120, 450-456.
- Flower, D.J.M., & Sanjayan, J.G. (2017). Greenhouse gas emissions due to concrete manufacture, *Handbook Low Carbon Concrete*, Elsevier Inc, p. 425.
- Fordham, C.J., & Smalley, I.J. (1985). A simple thermogravimetric study of hydrated cement, *Cement Concrete Research*, 15, 141–144.

- Gastaldi, D., Canonico, Capelli, L. F. Buzzi, L., Boccaleri, E., & Irico, S. (2005). An investigation on the recycling of hydrated cement from concrete demolition waste, *Cement & Concrete Composites*, 61, 29-35.
- He, Z., Zhu, X., Wang, J., Mu, M., & Wang, Y. (2019). Comparison of CO₂ emissions from OPC and recycled cement production, *Construction and Building Materials*, 211, 965-973.
- Jaroslav, T., & Zdenek, P. (2017). Properties and microstructure of cement paste including recycled concrete powder. *Acta Polytechnica*, 57(1), 49–57.
- Kawano H. (1995). The state of reuse of demolished concrete in Japan. Integrated design and environmental issues in concrete technology. In: Proceedings of the international workshop “rational design of concrete structures under severe conditions”, Hakodate, Japan.
- Khatib, J. M. (2005). Properties of concrete incorporating fine recycled aggregate, *Cement and Concrete Research*, 35(4), 763–769.
- Kim, Y. J., & Choi, Y. W. (2012). Utilization of waste concrete powder as a substitution material for cement, *Construction and Building Materials*, 30, 500-504.
- Kim, H. S., Kim, B., Kim, K. S. & Kim, J. M. (2017). Quality improvement of recycled aggregates using the acid treatment method and the strength characteristics of the resulting mortar, *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 19, 968–976.
- Kwon, E., Ahn, J., Cho, B., & Park, D. (2015). A study on development of recycled cement made from waste cementitious powder. *Construction and Building Materials*, 83(9), 174–180.
- Lauritzen, E. K. (2016). Sustainable recycling of concrete – challenges and opportunities, In Proceedings of the Cementos Argos S.A. Foro Argos 360 En Concrete, Botoga, Columbia.
- Lu, B., Shi, C., Zhang, J., & Wang, J. (2018). Effects of carbonated hardened cement paste powder on hydration and microstructure of Portland cement, *Construction and Building Materials*, 186, 699-708.
- Ma, Z., Li, W., Wu, H., & Cao, C. (2019). Chloride permeability of concrete mixed with activity recycled powder obtained from C&D waste. *Construction and Building Materials*, 199, 652–663.
- Meddah, A., Chikouche, M. A., Yahia, M., Deghfel, M., & Bedda, M. (2022). The Efficiency of Recycling Expired Cement Waste in Cement Manufacturing: a Sustainable Construction Material, *Circular Economy and Sustainability*, 2, 1213-1224.
- Maddalena, R., Roberts, J. J., & Hamilton, A. (2018). Can Portland cement be replaced by low-carbon alternative materials? A study on the thermal properties and carbon emissions of innovative cements, *Journal of Cleaner Production*, 186, 933-942
- Meier, M.R., Napharatsamee, T., & Plank, J. (2017). Dispersing performance of superplasticizers admixed to aged cement. *Construction and Building Materials*, 139, 232–240.
- Monteiro, P.J. M., Miller, S. A., & Horvath, A. (2017). Towards sustainable concrete, *Nature Materials*, 16, 698-699.

- Moon, D. J., Kim, Y. B., & Ryou, J.S. (2008). An approach for the recycling of waste concrete powder as cementitious materials. *Journal of Ceramic Processing Research*, 9(3), 278–281.
- Papamichael, L., Voukkali, I., Loizia, P., & Zorpa, A. A. (2022). Construction and demolition waste framework of circular economy: A mini review, *Waste Management & Research*, 41 (12), 1728-1740.
- Poon, C. S., Azhar, S., Anson, M., & Wong, Y.L. (2001). Strength and durability recovery of fire-damaged concrete after post-fire-curing, *Cement and Concrete Research*, 1307– 13180.
- Rodriguez-Morales, J., Burciaga-Diaz, O., Gomez-Zamorano, L. Y., & Escalante-Garcia, J. I. (2024). Transforming construction and demolition waste concrete as a precursor in sustainable cementitious materials: An innovative recycling approach, *Resources, Conservation and Recycling*, 204, 107474.
- Schoon, J., De Buysse, K.D., I.V. Driessche, & De Belie, N. (2015). Fines extracted from recycled concrete as alternative raw material for Portland cement clinker production, *Cement & Concrete Composites*, 58, 70–80.
- Serpell, R., & Lopez, M. (2013). Properties of mortars produced with reactivated cementitious materials, *Cement & Concrete Composites*, 39,104–114.
- Serpell, R., Lopez, M. (2015). Properties of mortars produced with reactivated cementitious materials *Cement and Concrete Composites*, 64, 16–26.
- Shah, I.H., Miller, S. A., Jiang, D., & Myers, R.J. (2022). Cement substitution with secondary materials can reduce annual global CO2 emissions by up to 1.3 gigatons, *Nature Communications*, 13, 5758.
- Shi, C., Li, Y., Zhang, J., Li, W., Chong, L. & Xie, Z. (2016). Performance enhancement of recycled concrete aggregate—A review. *Journal of Cleaner Production*, 112(2), 466–472.
- Shima, H., Tateyashiki, H., Matsushashi, R. & Yoshida, Y. (2005). An Advanced Concrete Recycling Technology and its Applicability Assessment through Input-Output Analysis, *Journal of Advanced Concrete Technology*, 3 (1), 53-67.
- Shin, S., Kim, G., Kim, J., Kim, H., & Park, S. (2025). Assessment of the Applicability of Waste Concrete Fine Powder as a Raw Material for Cement Clinker, *Recycling*, 10, 17.
- Shui, Z., Xuan, D., Chen, W., Yu, R., & Zhang, R. (2007). Cementitious characteristics of hydrated cement paste subjected to various dehydration temperatures, *Construction and Building Materials*, 23, 531–537.
- Shui, Z., Xuan, D., Wan, H., & Cao, B. (2008). Rehydration reactivity of recycled mortar from concrete waste experienced to thermal treatment. *Construction and Building Materials*, 22, 1723-1729.
- Siriruang, C., Toochinda, P. Julnipitawong, P., & Tangtermsirikul, S. (2016). CO2 capture using fly ash from coal fired power plant and applications of CO2-captured fly ash as a mineral admixture for concrete, *Journal of Environmental Management*, 170, 70–78.

Splittgerber, F., & Mueller, A. (2003). inversion of the cement hydration as a new method for identification and/or recycling, In: International congress on the chemistry of cement.

Semugaza, G., Mielke, T., & Castillo, M. E. (2023). Reactivation of hydrated cement powder by thermal treatment for partial replacement of ordinary portland cement, *Materials and Structures*, 56, 48.

Tam, V. W. Y., Tam, C. M., & Le, K. N. (2007). Removal of cement mortar remains from recycled aggregate using pre-soaking approaches, *Resources, Conservation and Recycling*, 50, 82–101.

Taylor, H. F. W. (1997). *Cement chemistry*, second ed., Thomas Telford, 1998. ISBN 0727725920, 9780727725929.

Wang, J., Mu, M., & Liu, Y. (2018). Recycled cement, *Construction and Building Materials*, 190, 1124–1132.

Whittaker, M., Dubina, E., Al-Mutawa, F., Arkless, L., Plank, J., & Black, L. (2013). The effect of prehydration on the engineering properties of CEM I Portland cement. *Advances Cement Research*, 25(1), 12–20.

Xi, C., Li, Y., Bai, H., & Ma, L. (2021). Utilization of Recycled Concrete Powder in Cement Composite: Strength, Microstructure and Hydration Characteristics, *Journal of Renewable Materials*, 9 (12), 2189-2208.

Xiao, J., Ma, Z., Sui, T., Akbarnezhad, A., & Duan, Z. (2018). Mechanical properties of concrete mixed with recycled powder produced from construction and demolish waste, *Journal of Cleaner Production*, 188 (1), 720-731.

Xuan, D. X., & Shui, Z. H. (2010). Rehydration activity of hydrated cement paste exposed to high temperature, *Fire Matererials*, 35, 481–490.

Yu, Y., Ge, Y., & Liu, P. (2019). Recycling of expired cement and aged supplementary cementitious materials based on close packing theory and space filling effect. *Journal of Cleaner Production*, 239, 118064.

Yu, R., & Shui, Z. (2013). Influence of agglomeration of a recycled cement additive on the hydration and microstructure development of cement based materials, *Construction and Building Materials*, 49, 841-851.

Zghait, L. A. G., Hamad, H. H., Yousif, M. Z., & Al-Hamd, R. Kh. S. (2025). Development of eco-friendly binder using waste cement powder-silica fume and micro steel fbres, *Innovative Infrastructure Solutions*, 10, 71.

Zhao, Z., Remond, S., Damidot, D., & Xu, W. (2015). Influence of recycled concrete aggregates on the properties of mortars. *Construction and Building Materials*, 81,179–186.

Zhu, C., Fang, Y., & Wei, H. (2018). Carbonation-cementation of recycled hardened cement paste powder, *Construction and Building Materials*, 192, 224–232.

Zhutovsky, S., & Shishkin, A. (2021). Recycling of hydrated Portland cement paste into new clinker, *Construction and Building Materials*, 280, 122510.

Chapitre II

Matériaux et Procédures

Expérimentales

Introduction :

La résistance et la durabilité du matériau cimentaire dépendent beaucoup de la qualité des matériaux utilisés dans sa composition. Il est donc essentiel d'étudier précisément ces constituants en avance afin d'assurer les propriétés requises du béton à l'état frais et durci.

Dans ce chapitre, nous présentons les matériaux de l'étude, les procédures de confection et de conservation des éprouvettes, ainsi que les techniques des essais effectués.

II.1. Caractérisation des matériaux utilisés :

II.1.1. Liants

II.1.1.1. Ciment recyclé (CR)

Sans un stockage adéquat, le ciment risque de devenir préhydraté. Le recyclage de ce matériau représente donc une démarche écologique essentielle. Pour cela, cette étude vise à évaluer l'impact du remplacement partiel du ciment par une poudre de ciment préhydraté recyclé, sur les performances et la durabilité du mortier. Dans cette étude, un ciment résistant au sulfate (CEM I 42,5 N-SR3, Mokaouem) ayant subi une mauvaise conservation pendant 4 ans, entraînant sa préhydratation et son agglomération (Photo II.1), a été étudié.



Photo II.1. Déchets de ciment préhydraté. (Source : Auteurs)

Les étapes de préparation de ciment recyclé (CR) sont les suivantes (Photo II.2):

- **Broyage et tamisage** : un broyage manuel de ciment préhydraté est effectué au premier à l'aide d'un marteau pour désagréger les blocs agglomérés, suivi d'un tamisage visant à récupérer uniquement les particules très dures. Ensuite, ces particules sont soumises à un broyage mécanique à l'aide d'une machine Micro-Deval, puis à un tamisage final au tamis de 200 μm afin d'obtenir une poudre homogène.
- **Calcination** : la poudre obtenue est ensuite calcinée dans un four électrique à 450 °C pendant trois heures, afin d'effectuer la déshydratation du ciment préhydraté. La calcination a été effectuée par lots de 100g. La température de calcination a été atteinte à partir de la température ambiante, avec une vitesse d'augmentation de 10 °C par minute jusqu'à 450 °C, comme illustré sur la Figure II.1. Le refroidissement s'est effectué à l'intérieur du four jusqu'à ce que la température diminue naturellement. Après traitement, le ciment recyclé est conservé dans une boîte en plastique, afin de le protéger de l'humidité et d'éviter toute nouvelle préhydratation.



Photo II.2. Étapes de préparation de ciment recyclé. (Source : Auteurs)

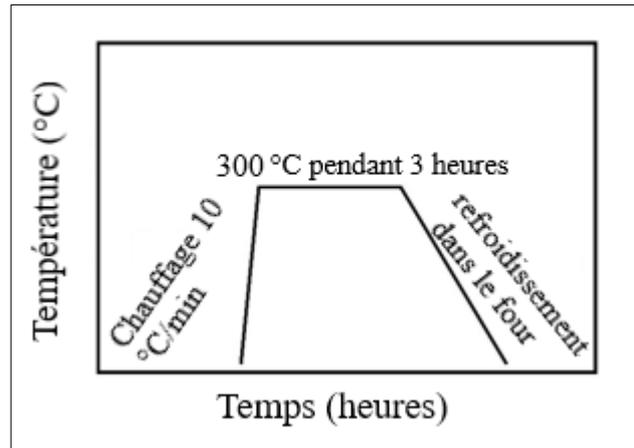


Figure II.1. Procédure de traitement thermique de ciment. (Source : Auteurs)

II.1.1.2. Ciment de référence

Le ciment de référence utilisé dans notre étude a le même type que le ciment préhydraté. C'est un ciment Mokaouem CEM II/B-L 42,5 N (Photo II.3), conforme à la norme algérienne [NA442, 2013] et Européenne [EN 197-1, 2006]. Les caractéristiques chimiques et physiques du ciment sont respectivement dans les Tableaux II.1 et II.2.



Photo II.3. Ciment utilisé. (Source : Auteurs)

Tableau II.1. Caractéristiques chimiques et minéralogiques du ciment. (Source : [dehane, 2023])

| Composition chimique | Valeur (%) |
|--------------------------------|------------|
| SiO ₂ | 16.74 |
| Al ₂ O ₃ | 4.02 |
| Fe ₂ O ₃ | 2.88 |
| CaO | 63.35 |
| MgO | 1.68 |
| K ₂ O | 0.54 |
| Na ₂ O | 0.07 |
| SO ₃ | 2.16 |
| Cl | 0.02 |
| Pertes au feu | 0.81 |
| Composition minéralogique | Valeur (%) |
| C ₃ S | 63.61 |
| C ₃ A | 5.75 |
| C ₄ AF | 12.23 |

Tableau II.2. Caractéristiques physiques du ciment. (Source : [LAFARGE, 2025])

| Caractéristique | Valeur |
|---|-----------|
| Expansion "Le Chatelier" (mm) | <2.00 |
| Retrait à 28jours (µm/m) | <1000 |
| Finesse suivant la méthode de Blaine (cm ² /g) | 3200-3800 |
| Chaleur d'hydratation (j/g) | <270 |

I.1.1.3. Analyses des ciments utilisés

- **Caractéristiques chimiques**

Après traitement thermique à 450 °C, une perte de masse d'environ 6 % a été observée (Photo II.4). Cette perte est principalement attribuée à l'évaporation de l'eau libre ainsi qu'à la libération de l'eau adsorbée dans les produits hydratés tels que le C-S-H, ainsi qu'à la déshydratation partielle du C-S-H [Zhutovsky et shishkin, 2021]. Wang et al. [Wang et al., 2018] ont étudié une pâte de ciment Portland hydratée âgée de deux ans et les analyses thermogravimétriques (TG/DTG) ont montré qu'à 400 °C, la perte de masse atteignait environ 10 % du poids et ils ont conclu que la pâte était entièrement hydratée. Ces résultats suggèrent que le ciment recyclé utilisé dans cette étude n'est pas totalement hydraté, et contient des constituants non hydratés.

D'autre part, les analyses thermogravimétriques (TG/DTG) menées par Wang et al. [Wang *et al.*, 2018] sur le ciment recyclé traité à 450 °C montrent que le carbonate de calcium (CaCO_3) constitue une part significative de sa composition.



Photo II.4 Ciment préhydraté après calcination. (Source : Auteurs)

- **Caractéristiques physiques**

Pour évaluer les masses volumiques apparentes et absolues des ciments utilisés dans cette étude, des essais ont été réalisés conformément aux normes [NF EN 1097-3, 1998] et [NF EN 1097-7, 1997], respectivement (Photo II.5). Les résultats des masses volumiques calculées sont présentés dans le Tableau II.3. À partir des résultats, on peut remarquer que les masses volumiques de ciment recyclé sont inférieures à celle du ciment normal.



Photo II.5. Mesure de la masse volumique absolue de ciment. (Source : Auteurs)

Tableau II.3. Masses volumiques des matériaux cimentaires. (Source : Auteurs)

| Propriétés | Ciment normal | Ciment recyclé |
|---|---------------|----------------|
| Couleur | gris | gris |
| Masse volumique apparente ρ_{app} (g/cm ³) | 1.16 | 1.01 |
| Masse volumique absolue ρ_{abs} (g/cm ³) | 3.29 | 2.74 |

II.1.2. Sable

Pour la préparation des éprouvettes de mortier de notre étude, le sable utilisé est un sable naturel provenant de la vallée d'Oued M'zi de la wilaya de Laghouat (Photo II.6).

Une série d'essais a été effectuée au laboratoire LTPS de Ghardaïa afin de caractériser les propriétés physiques, mécaniques et chimiques de sable. Les sections suivantes décrivent les différentes étapes de ces essais ainsi que les résultats obtenus.

**Photo II .6.** Sable utilisé. (Source : Auteurs)

a) Analyse granulométrique :

L'étude granulométrique du sable constitue une étape essentielle pour obtenir une compacité optimale du mortier, en raison de son influence directe sur les propriétés à l'état frais et durci. Pour cela, une analyse granulométrique du sable utilisé dans cette étude a été réalisée (Photo II.7) conformément à la norme européenne [NF EN 933-1, 2012]. Les résultats obtenus sont présentés dans le Tableau II.4. Les pourcentages de passant cumulé de sable sont représentés sous forme de courbes granulométriques dans la Figure II.2.



Photo II.7. Analyse granulométrique de sable. (Source : Auteurs)

Tableau II.4. Analyse granulométrique de sable. (Source : Auteurs)

| Tamis (mm) | Refus Partiel (g) | Refus cumulé (g) | Pourcentage Refus | Pourcentage passant |
|---------------------------------|-------------------|------------------|-------------------|---------------------|
| 4 | 6,3 | 6,3 | 0,671 | 99,329 |
| 2 | 17,9 | 24,2 | 2,579 | 97,421 |
| 1 | 24,7 | 48,9 | 5,212 | 94,788 |
| 0,5 | 194,2 | 243,1 | 25,914 | 74,086 |
| 0,25 | 487,2 | 730,3 | 77,848 | 22,152 |
| 0,125 | 144,1 | 874,4 | 93,209 | 6,79 |
| 0,063 | 46,7 | 921,1 | 98,187 | 1,813 |
| Coefficient d'uniformité (Cu) = | | | 3.03 | |
| Module de finesse | | | 2,05 | |

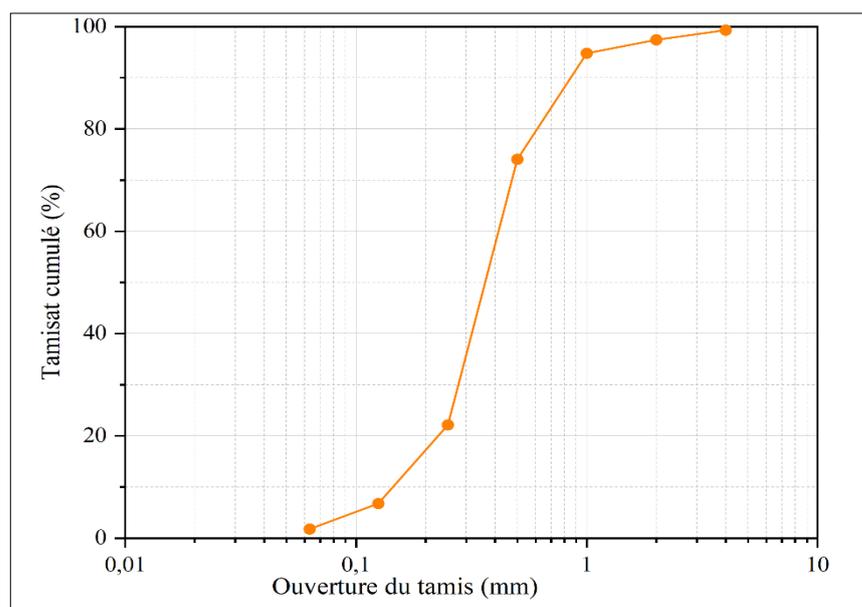


Figure II.2. Analyse granulométrique de sable. (Source : Auteurs)

Les résultats obtenus montrent que le module de finesse de sable utilisé est compris entre 1.8 et 2.8, ce qui signifie que le sable se situe dans l'intervalle recommandé pour un sable idéal destiné au béton, selon la norme [NF EN 18-540, 1997] et le DTR BE 2.1 [DTR BE 2.1, 2010]. De plus, la valeur de coefficient d'uniformité C_u de sable est supérieure à 2, donc c'est un sable de granularité étalée [Benghazi, 2015], ce qui permet d'obtenir un mortier homogène.

b) Masses volumiques :

Les masses volumiques des granulats constituent un paramètre essentiel pour évaluer la densité intrinsèque de sable et leur porosité ainsi que d'établir la conversion des proportions en masse en volumique. Pour cela, nous avons mesuré les masses volumiques apparentes (Photo II.8) et absolues (Photo II.9) pour notre sable selon les normes [NF EN 1097-3, 1998] et [NF EN 1097-6, 2014], respectivement. Les masses volumiques calculées sont présentées dans le



Tableau

Photo II.8. Masse volumique apparente de sable. (Source : Auteurs)



Photo II.9. Masse volumique absolue de sable. (Source : Auteurs)

Tableau II.5. Résultats des masses volumiques de sable. (Source : Auteurs)

| Propriétés | Valeur |
|---|--------|
| Masse volumique apparente ρ_{app} (g/cm ³) | 1.66 |
| Masse volumique absolue ρ_{abs} (g/cm ³) | 2.65 |

c) Propreté de sable :

La propreté des granulats doit être toujours vérifiée, car l'utilisation des granulats non propres avec des impuretés argileuses peut affecter négativement les propriétés mécaniques et la durabilité de matériau cimentaire. Dans la présente étude, la propreté de sable est vérifiée en utilisant l'essai d'équivalent de sable selon la norme [NF EN 933-8, 2012] (Photo II.10) et l'essai au bleu de méthylène selon la norme [NF EN 933-9, 2022] (Photo II.11). Les résultats de l'essai sont présentés dans le Tableau II.6.



Photo II.10. Essai équivalent de sable. (Source : Auteurs)

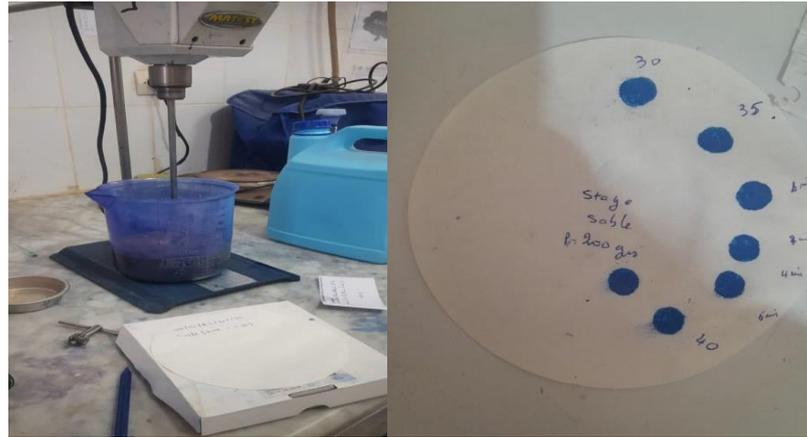


Photo II.11. Essai au bleu de méthylène. (Source : Auteurs)

Tableau II.6. Résultats des essais de propreté. (Sources : Auteurs)

| Échantillon | H ₁ (cm) | H ₂ (cm) | ES (%) | ES moyen (%) | MB |
|-------------|---------------------|---------------------|---------|--------------|------|
| 1 | 115 | 69 | 60 | 58.5 | 0.05 |
| 2 | 117 | 67 | 57 | | |

Les résultats de Tableau II.6 montrent que le sable utilisé dans cette étude a un ES = 58.5 qui est légèrement inférieure à 60% valeur recommandée par la norme [NF EN 18-540, 1997] pour un béton de qualité. La valeur de bleu pour le sable utilisé dans notre étude est : MB= 0 ,05 < 1 valeur maximale exceptée par la norme [NF EN 18-540, 1997].

d) Caractéristiques chimiques des granulats :

Le sable utilisé dans cette étude est soumis à une analyse chimique selon les méthodes normalisées et les résultats obtenus sont présentés dans le Tableau II.7.

Tableau II.7. Analyses chimiques de sable. (Source : Auteurs)

| Propriétés mesurées/Norme | Sable |
|---|-------|
| Insolubles (%) NFP 15-461 | 91 |
| Carbonates (% CaCO ₃) NFP15-461 | 03 |
| Chlorures : % Cl ⁻ | 0.003 |
| NaCl | 0.006 |

II.1.3. Eau de gâchage

L'eau de gâchage utilisée ne doit pas contenir d'excès de substances susceptibles d'influencer la réaction d'hydratation et altérer la qualité finale du mortier. Dans cette étude, l'eau utilisée pour les essais est l'eau de robinet qui circule dans le laboratoire LTPS, qui est considérée potable et propre. Les résultats des analyses physico-chimiques de l'eau selon les méthodes normalisées sont présentés dans le Tableau II.8.

Tableau II.8. Résultats des analyses de l'eau de gâchage. (Source : LTPS)

| Paramètres | Unité | Concentration | Limites ([NF EN 1008]) |
|-------------------------------|-------|---------------|-----------------------------|
| Ph | - | 7.83 | > 5 |
| SO ₄ ⁻² | mg/l | 576.17 | ≤ 2000 |
| Cl ⁻ | mg/l | 359.82 | ≤ 1000 (béton armé) |
| Taux de résidus secs | mg/l | 1175 | |

II.2. Étude de l'influence de ciment recyclé sur l'hydratation et la stabilité du volume du ciment:

Pour étudier l'effet de ciment recyclé sur l'hydratation de ciment, on a effectué des essais de prise en utilisant l'appareil de Vicat (Photo II.12) selon la norme [EN 196-3, 2017]. L'appareil de Le Chatelier (Photo II.13) a été utilisé pour évaluer la stabilité de volume des pâtes hydratées selon la norme [EN 196-3, 2017].

Dans cette étude, des pâtes de ciment ont été préparées en remplaçant partiellement le ciment normal par 15 %, 25 % et 45 % de ciment recyclé (CR), exprimés en pourcentage du poids de ciment. Les proportions ont été établies en mélangeant préalablement la quantité nécessaire de ciment recyclé avec le ciment normal. Le rapport eau/ciment utilisé dans tous les mélanges a été fixé à partir du dosage déterminé lors de l'essai de consistance réalisé sur le mélange témoin (100 % ciment normal). Cette même quantité d'eau a ensuite été maintenue pour l'ensemble des mélanges contenant du ciment recyclé, afin d'assurer des conditions expérimentales comparables.



Photo II.12. Essai de prise de ciment.

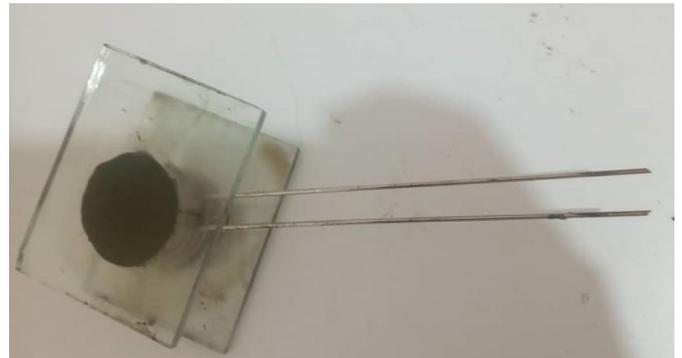


Photo II.13. Essai de la stabilité de volume du ciment. (Source : Auteurs)

II.3. Étude de l'influence de ciment recyclé sur la résistance mécanique du mortier:

II.3.1. Formulation et Confection des éprouvettes :

Dans notre étude nous avons préparé des éprouvettes de mortier en utilisant les formulations présentées dans le Tableau II.14. Le mortier de référence est préparé avec le ciment normal. Quatre types de mortiers contenant 5%, 15%, 25% et 50% de ciment recyclé (en poids du ciment) ont été préparés. Le ciment recyclé (CR) a été préalablement mélangé avec le ciment. Les éprouvettes confectionnées sont de dimensions $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$, confectionnées selon la norme [EN 196-1, 2016] et [IS:4031 (part 6), 2005]. Les éprouvettes ont été démoulées 24 heures après le coulage et placées ensuite dans une chambre humide jusqu'au jour de l'essai.

Tableau II.9. Formulation des mortiers étudiés. (Source : Auteurs)

| Matériaux | Témoin | 5% CR | 15% CR | 25% CR | 50% CR |
|--------------------|--------|-------|--------|--------|--------|
| Sable (g) | 1350 | | | | |
| Ciment (g) | 450 | 427.5 | 382.5 | 337.5 | 225 |
| Eau (g) | 247.5 | | | | |
| Ciment recyclé (g) | 0 | 22.5 | 67.5 | 112.5 | 225 |

II.3.2. Résistance mécanique du mortier

La résistance à la traction par flexion des mortiers a été évaluée à l'aide d'essais de flexion à 3 points réalisés selon la norme [EN 196-1, 2016]. Pour chaque concentration et temps, trois éprouvettes ont d'abord été testées par flexion, puis les six demi-prismes obtenus ont été soumis à la compression (Photo II.9).

Les lectures de la charge en KN sur l'appareil sont converties en contraintes de traction ou compression en utilisant les équations suivantes :

$$\text{*Résistance à la traction par flexion (MPa)} : \sigma_t = \frac{1.5 F_f L}{b^3} \quad (\text{II.1})$$

Avec F_f est la charge de rupture de l'éprouvette en traction par flexion (N).

b : largeur de la section carrée ($b=40\text{mm}$) L : distance entre appuis ($L = 100\text{mm}$)

$$\text{*Résistance à la compression (MPa)} : \sigma_c = \frac{F_c}{S} = \frac{F_c}{b^2} \quad (\text{II.2})$$

Avec F_c est la charge de rupture de l'éprouvette en compression (N).

S : la surface transversale de l'éprouvette (mm^2).



Photo II.14. Mesure de la résistance mécanique du mortier. (Source : Auteurs)

II.4. Étude de l'influence de ciment recyclé sur la durabilité du mortier:

II.4.1. Absorption capillaire

L'essai d'absorption capillaire permet d'étudier la capacité des éprouvettes de mortier non saturées à absorber l'eau, lorsqu'elles sont mises en contact avec de l'eau en l'absence de pression hydraulique.

Dans cette étude, l'essai est effectué selon la norme [EN 480-5, 2005]. Des prismes de dimensions $4 \times 4 \times 8 \text{ cm}^3$, âgés de plus de 28 jours, contenant différents pourcentages de ciment recyclé ont été séchés au four pendant 24 heures à $105 \text{ }^\circ\text{C}$. Après stabilisation de leur masse, leurs faces latérales ont été recouvertes d'un ruban en aluminium afin d'assurer une absorption uniaxiale de l'eau (Figure II.3). La masse initiale des éprouvettes est alors mesurée. Ensuite, ils sont placés dans un récipient contenant de l'eau, avec une hauteur d'immersion limitée à 3 mm à l'aide de cales. À chaque intervalle de temps (0.25, 0.5, 2, 4 et 24 heures), les éprouvettes sont retirées, essuyées délicatement, pesées, puis replacées dans le récipient jusqu'à la fin de l'essai à 24 heures.

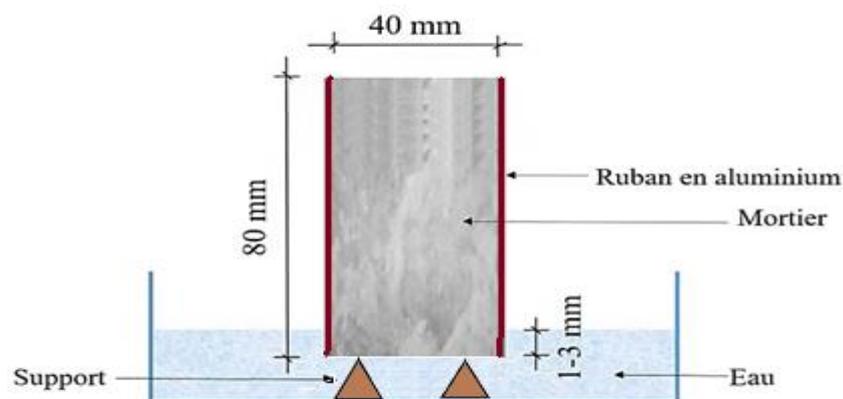


Figure II.3. Essai d'absorption capillaire. (Source : Auteurs)

Pour une échéance donnée, l'absorption capillaire « CA » est exprimée en grammes par millimètre carré (g/mm^2), par la formule suivante :

$$C_{at} = \frac{M_j - M_0}{S} \quad (\text{II.3})$$

Avec

M_0 : masse initiale de l'éprouvette (Kg).

M_x : masse de l'éprouvette après le temps requis d'absorption (Kg).

S : section de la base de l'éprouvette (m^2).

L'absorptivité correspond à la vitesse d'absorption de l'eau par capillarité. Elle est déterminée par une régression linéaire appliquée aux mesures situées dans l'intervalle où l'évolution du coefficient d'absorption capillaire C_{at} est linéaire. L'absorptivité C_a ($\text{Kg.m}^{-2}\text{h}^{-1/2}$) est calculé par l'équation suivante :

$$C_a = \frac{C_{a4} - C_{a1}}{\sqrt{4} - \sqrt{1}} \quad (\text{II.4})$$

C_{a4} et C_{a1} : sont respectivement le coefficient d'absorption à 1 et 4 heures.

II.4.2. Résistance à l'attaque acide

Après une cure à l'eau de 28 jours, le poids initial des éprouvettes de mortier ($4 \times 4 \times 8 \text{ cm}^3$) a été mesuré et enregistré avant leur immersion dans une solution acide diluée. Une solution d'acide sulfurique (H_2SO_4) à 5 % de concentration a été préparée en laboratoire. Les éprouvettes sont ensuite émergées dans la solution (Photo II.10) et tout changement poids a été mesuré toutes les 360 heures jusqu'à atteindre une durée totale de 672 heures (28 jours). La valeur du pH de la solution d'acide sulfurique a été maintenue à pH 1. Le pH de la solution a été renouvelé chaque 14 jours afin de le garder constant.

La résistance à l'attaque acide est effectuée selon la norme [ASTM C 267-96, 2006]. Après immersion, les éprouvettes sont nettoyées avec de l'eau afin d'éliminer le mortier altéré, puis pesées pour déterminer la perte de masse. La perte de masse due à l'attaque acide est évaluée par l'expression suivante :

$$\text{Perte de masse (\%)} = \frac{M_1 - M_2}{M_1} \quad (\text{II.5})$$

M_1 : masse initiale des éprouvettes avant immersion dans l'acide (g).

M_2 : masse après altération à l'âge de 28 jours (g).



Photo II.15. Mesure de résistance à l'attaque acide. (Source : Auteurs)

Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté les propriétés physiques, mécaniques et chimiques des matériaux utilisés pour la confection des éprouvettes de mortier étudié. Les essais réalisés pour évaluer le comportement du mortier à l'état frais et durci ont également été présentés. Les résultats obtenus à partir de ces essais seront présentés discutés dans le chapitre suivant.

Références Bibliographique

ASTM International. (2006). *Standard Test Methods for Chemical Resistance of Mortars, Grouts, and Monolithic Surfacing and Polymer Concretes* (C267-01).

Benghazi, Z. (2015). Technologie des géomatériaux. Chapitre II. Document de cours Université Larbi Tebessi-Tebessa(Algérie). Tiré de : https://zied-benghazi.weebly.com/uploads/2/4/5/8/24585230/chapitre_ii_-_granulats.pdf

Centre National de Recherche Appliqués en Génie Parasismique. (2010). *DTR BE 2.1: Règle d'exécution des ouvrages en béton armé 2010*. Algérie

Comité Européen de Normalisation. (2012). *NF EN 933-1 : Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats - Partie 1 : détermination de la granularité - Analyse granulométrique par tamisage*. AFNOR.

Comité Européen de Normalisation. (1997). *NF P18-540 : Granulats Définitions, conformité, spécifications*. AFNOR.

Comité Européen de Normalisation. (1998). *NF EN 1097-3 : Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats - Partie 3 : méthode pour la détermination de la masse volumique en vrac et de la porosité intergranulaire*. AFNOR.

Comité Européen de Normalisation. (2014). *NF EN 1097-6 : Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats - Partie 6 : détermination de la masse volumique et du coefficient d'absorption d'eau*. AFNOR

Comité Européen de Normalisation. (2012). *NF EN 933-8 : Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats - Partie 8 : évaluation des fines - Équivalent de sable*. AFNOR

Comité Européen de Normalisation. (2022). *NF EN 933-9 : Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats - Partie 9 : qualification des fines - Essais au bleu de méthylène*. AFNOR

Comité Européen de Normalisation. (2006). *NF EN 197-1: Ciment - Partie 1: Composition, spécifications et critères de conformité de ciments courants*. AFNOR.

Comité Européen de Normalisation. (1999). *NF EN 1097-7 : Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats - Partie 7 : détermination de la masse volumique absolue du filler - Méthode au pycnomètre*. AFNOR

Comité Européen de Normalisation. (2017). *NF EN 196-3 : Méthodes d'essai des ciments - Partie 3 : détermination du temps de prise et de la stabilité*. AFNOR

Comité Européen de Normalisation. (2016). *NF EN 196-1 : Méthodes d'essais des ciments - Partie 1 : détermination des résistances*. AFNOR

Comité Européen de Normalisation. (2005). *NF EN 480-5 : Admixtures for concrete, mortar and grout — Test methods — Part 5: Determination of capillary absorption*. AFNOR

Dehane, S. (2023). *Contribution à l'étude de la durabilité des bétons gâchés par des eaux épurées, thèse de doctorat, Université de Kasdi Merbah de Ouargla.*

Indian Standard. (2005). *IS :4031 (Part 6) : Methods Of Physical Tests For Hydraulic Cement - Part 6 : Determination Of Compressive Strength Of Hydraulic Cement Other Than Masonry Cement. BUREAU OF INDIAN STANDARDS*

Institut Algérien de Normalisation. (2013). *Norme Algérienne NA442. Ciment-Composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants.*

Lafarge. (n.d). (2025). *Ciment Mokaouem [Fiche produit]. Tiré de : <https://www.lafarge.dz/sites/algeria/files/docs/fiche-produit-ciment-mokaouem-tm-plus-en-francais.pdf>*

Zhutovsky, S., & Shishkin, A. (2021). Recycling of hydrated Portland cement paste into new clinker, *Construction and Building Materials*, 280, 122510.

Wang, J., Mu, M., & Liu, Y. (2018). Recycled cement, *Construction and Building Materials*, 190, 1124–1132.

Chapitre III

Résultats et interprétations

Introduction :

Le présent chapitre est dédié à la présentation et à l'interprétation des résultats expérimentaux obtenus. Les investigations menées portent sur les aspects suivants :

- Effet du ciment recyclé (CR) sur l'hydratation du ciment;
- Effet du ciment recyclé (CR) sur la masse volumique du mortier ;
- L'effet du ciment recyclé (CR) sur la résistance mécanique du mortier;
- Effet du ciment recyclé (CR) sur la durabilité du mortier.

III.1. Résultats de l'étude de l'effet de ciment recyclé sur l'hydratation du ciment :

Pour étudier l'influence de ciment recyclé sur l'hydratation de ciment, on a effectué des essais de prise sur des pâtes de ciment contenant 15, 25 et 45% de ciment recyclé et les résultats obtenus sont présentés dans le Graphe III.1 et le Tableau III.1.

Graphe III.1. Variation des temps de prises en fonction du pourcentage de ciment recyclé (CR). (Source : Auteurs)

Tableau III.1. Effet de ciment recyclé sur l'hydratation et la stabilité du volume du ciment. (Source : Auteurs)

Les résultats des temps de prise obtenus dans cette étude sont en accord avec ceux rapportés par Bogas et al. [Bogas et al., 2020] qui ont observé une augmentation des temps de début et de fin de prise dans la pâte de ciment recyclé. Toutefois, ces résultats sont en contradiction avec ceux rapportés par certains auteurs ([Shui et al., 2009], [Bogas et al., 2019], [Xuan et Shui, 2010], [Yu et Shui, 2013]), qui ont observé une diminution des temps de prise pour les ciments traités thermiquement. En effet, ces auteurs indiquent que l'hydratation

de CaO ainsi que l'absorption d'eau par le ciment recyclé sont à l'origine d'un phénomène de prise rapide observé au début de la préparation de la pâte.

Pour évaluer l'effet de CR sur la consistance de la pâte de ciment, la pénétration de la sonde de consistance a été mesurée pour chacun des mélanges et les résultats sont présentés dans le Tableau III.1. L'analyse des résultats montre une diminution de la consistance de la pâte avec l'ajout de CR. Cette perte de consistance peut être attribuée à une demande en eau plus élevée nécessaire dans les mélanges contenant le ciment recyclé pour maintenir la même consistance normale. Ces résultats sont en accord avec les résultats Wang et al. [Wang et al., 2018] et ceux de Yu et Shui [Yu et Shui, 2013], qui ont expliqué que les particules de ciment traité thermiquement présentent une forte tendance à s'agglomérer en raison de leur surface spécifique élevée, ce qui augmente la demande en eau.

L'expansion mesurée selon l'essai Le Chatelier, présentée dans le Tableau III.1, montre que l'incorporation jusqu'à un pourcentage de 45 % de CR ne provoque aucune variation significative de l'expansion volumique du ciment.

III.2. Étude de l'effet de ciment recyclé sur la masse volumique du mortier :

Le Graphe III.2 montre la variation de la masse volumique apparente des différents mortiers étudiés.

Graphe III.2. Variation de la masse volumique avec le pourcentage de ciment recyclé (CR). (Source : Auteurs)

III.3. Étude de l'effet de ciment recyclé sur la résistance mécanique du mortier:

Dans cette étude, une comparaison rigoureuse sera effectuée entre les propriétés du mortier de référence, préparé sans ajout de ciment recyclé, et celles des éprouvettes de mortier dans lesquels une partie du ciment résistant au sulfate a été remplacée par différentes proportions de ciment recyclé.

Les pourcentages de remplacement étudiés dans cette recherche sont de 5 %, 15 %, 25 % et 50 % en poids total du ciment. L'influence de ciment recyclé sur la résistance mécanique de mortier est présentée dans le Tableau III.2 et les variations des résistances en fonction du temps sont illustrées dans les Graphes III.3 et III.4.

Tableau III.2. Variation de la résistance mécanique du mortier en fonction du pourcentage de ciment recyclé (CR). (Source : Auteurs)

Grphe III.3. Variation de la résistance à la compression du mortier en fonction du pourcentage de ciment recyclé (CR). (Source : Auteurs)

38.6% pour le mélange témoin. Ces résultats suggèrent un développement initial un peu

Graphe III.4. Variation de la résistance à la traction du mortier en fonction du pourcentage de ciment recyclé (CR). (Source : Auteurs)

Le Tableau III.2 et la Graphe III.4 montrent que l'ajout de ciment recyclé (CR) a un

III.4. Étude de l'effet de ciment recyclé sur la durabilité du mortier :

III.4.1. Absorption capillaire

L'effet de l'ajout de ciment recyclé (CR) sur l'absorption capillaire du mortier âgé de 28 jours est présenté dans le Graphe III.5. L'absorptivité des différents mortiers est présentée dans la Tableau III.3.

Graphe III.5. Effet de ciment recyclé (CR) sur l'absorption capillaire de mortier.

(Source : Auteurs)

Tableau III.3. Variation de l'absorptivité du mortier en fonction du pourcentage de ciment recyclé (CR). (Source : Auteurs)

(2,79) mais qui reste inférieurs à celle de mortier témoin. Cette diminution d'absorptivité peut être interprétée à la lumière des observations de Bogas et al. [Bogas et al., 2020], qui ont signalé une microstructure plus raffinée dans les pâtes à base de ciment recyclé, comparativement aux pâtes à base de ciment ordinaire (CEMI).

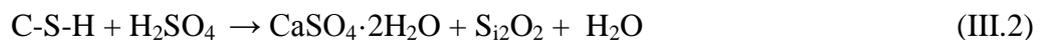
III.4.2. Résistance à l'attaque acide

Après des essais réalisés sur des mortiers contenant des proportions de ciment recyclé exposés à des milieux acides, l'impact sur leurs propriétés physiques et mécaniques a été évalué. L'analyse a porté sur la résistance à la compression, l'aspect extérieur et le degré de dégradation afin de déterminer la capacité du mortier à résister aux conditions agressives. La durabilité des mortiers contenant différents pourcentages de ciment recyclé (CR) soumis à une attaque acide pendant 28 jours est illustrée dans les Graphes III.6 et III.7.

Graphe III.6. Perte de la résistance à la compression après attaque acide. (Source : Auteurs)

L'analyse des résultats présentés dans le Graphe III.6 indique une diminution significative de la résistance à la compression pour tous les échantillons après exposition à l'acide, par rapport aux valeurs initiales enregistrées à 28 jours (Tableau III.2).

Cette dégradation mécanique et perte de masse (Graphe III.7) observée dans l'ensemble des mortiers contenant du ciment recyclé (CR) s'explique par les réactions chimiques entre l'acide et les constituants du ciment. Le H_2SO_4 , réagit avec la portlandite (CH) et les silicates de calcium hydratés (C-S-H), qui sont les principaux hydrates du ciment Portland. Au cours de ces réactions, la CH et les C-S-H se dissolvent, entraînant ainsi la formation de gypse ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$), selon les équations suivantes [Yuan *et al.*, 2013] :



Ce processus entraîne la détérioration du matériau cimentaire, car le gypse possède une résistance mécanique quasiment nulle [Yuan *et al.*, 2013].

Graphe III.7. Perte masse après attaque acide. (Source : Auteurs)

thermique du ciment recyclé. Ainsi, bien que le mélange à 50 % présente une perte de résistance importante, sa perte de masse réduite suggère une certaine stabilité dimensionnelle face à l'environnement acide. Toutefois, une analyse plus approfondie serait nécessaire pour confirmer ces hypothèses.



Photo III.1. Aspect visuel des mortiers après immersion dans l'acide. (Source : Auteurs)

L'observation visuelle des éprouvettes après immersion dans la solution acide (Photo III.1) met en évidence les différences de l'attaque acide selon la composition du mortier. Ces observations supportent les résultats de perte de résistance et de masse.

Sur la base de ces résultats, on peut conclure que le ciment recyclé peut être intégré sans effet néfaste majeur sur la durabilité acide jusqu'à 25 % de substitution. Au-delà, la résistance chimique se détériore, ce qui limite les possibilités d'utilisation du ciment recyclé dans des environnements chimiquement agressifs.

Conclusion :

À la lumière des résultats précédents concernant la résistance mécanique, la durabilité et la réponse à l'exposition dans des milieux acides, il apparaît que l'utilisation du ciment recyclé peut contribuer efficacement à l'amélioration de certaines propriétés physiques du béton, notamment lorsqu'il est ajouté à des proportions modérées ne dépassant pas 15 %. En effet, les échantillons contenant de faibles proportions de ce ciment ont montré des performances

acceptables en termes de résistance à la compression, de réduction de la perméabilité à l'eau, et de résistance relative aux environnements chimiques agressifs, ce qui reflète une meilleure compacité et stabilité interne du matériau. En revanche, une augmentation excessive de la proportion de ciment recyclé peut entraîner une dégradation des performances, ce qui souligne la nécessité de respecter un taux de substitution optimal afin de garantir un équilibre entre qualité technique et impact environnemental positif.

Références Bibliographique

Bogas, J. A., Carriço, A., & Pereira, M. F. C. (2019). Mechanical characterization of thermal activated low-carbon recycled cement mortars, *Journal of Cleaner Production*, 218, 377–389.

Bogas, J.A., Carriço, A., & Tenza-Abril, A.J. (2020). Microstructure of thermoactivated recycled cement pastes, *Cement and Concrete Research*, 138, 1062.

Shui, Z., Xuan, D., Wan, H., & Cao, B. (2009). Rehydration reactivity of recycled mortar from concrete waste experienced to thermal treatment. *Construction and Building Materials*, 22, 1723-1729.

Wang, J., Mu, M., & Liu, Y. (2018). Recycled cement, *Construction and Building Materials*, 190, 1124–1132.

Xuan, D. X., & Shui, Z. H. (2010). Rehydration activity of hydrated cement paste exposed to high temperature, *Fire Matererials*, 35, 481–490.

Yu, R., & Shui, Z. (2013). Influence of agglomeration of a recycled cement additive on the hydration and microstructure development of cement based materials, *Construction and Building Materials*, 49, 841-851.

Yuan, H., Dangla, P., Chatellier, P., & Chaussadent, T. (2013). Degradation modelling of concrete submitted to sulfuric acid attack, *Cement and Concrete Research*, 53, 267–277.

Conclusion Générale

Et Perspectives

Conclusion Générale :

Cette étude a permis d'évaluer l'effet du remplacement partiel du ciment par une poudre de ciment recyclé (CR), issue d'un ciment mal conservé pendant plusieurs années, sur les propriétés physico-mécaniques et la durabilité des mortiers. L'objectif principal était de mieux comprendre le potentiel de réutilisation de ce déchet après traitement thermique, en tant que liant cimentaire alternatif.

Sur la base des types de matériaux, des procédures de préparation et des pourcentages de substitution utilisés dans la présente étude, les conclusions suivantes ont été obtenues :

Perspectives :

Suite à cette étude, plusieurs perspectives peuvent être envisagées:

- ✚ Compléter les essais nécessaires sur le mortier à base de CR, y compris les analyses au microscope électronique à balayage (MEB), les essais de diffraction des rayons X (DRX) et les essais de corrosion des armatures.
- ✚ Évaluer la durabilité du mortier à base de CR face à d'autres agents agressifs (sulfates, cycles gel/dégel, carbonatation...).
- ✚ Étudier l'effet de ciment préhydraté activé avec d'autres paramètres de calcination (température, durée...) et finesse.
- ✚ Étudier l'impact de CR sur d'autres mélanges de mortier en utilisant, par exemple des ajouts cimentaires, superplastifiants...

Annexe

1-Fiche produit Mokaouem :



Mokaouem
مقاوم بلوس Plus

ALGÉRIE

LAFARGE
Construire
des villes meilleures™

**Ciment Portland**

Résistant aux sulfates

NA 442 - CEM I 42,5 N-SR 3

Mokaouem est un ciment gris résistant aux sulfates, résultat de la mouture d'un clinker contenant un faible taux d'aluminates de calcium avec une proportion de gypse inférieure à celle d'un ciment portland composé.

Mokaouem

NA 442 - CEM I 42,5 N-SR3

Mokaouem NA 442 -CEM I 42,5 N-SR3 selon la NA 442 v 2013 et la EN 197-1II est conforme à la norme nationale NA 442 v 2013 et à la norme Européenne EN 197-1 avec un taux en C3A < 3%.

AVANTAGES PRODUIT

- Tout en étant un ciment de haute performance, **Mokaouem** protège la structure contre les agressions chimiques de l'environnement externe.
- Une meilleure durabilité pour les structures en béton.
- Une faible chaleur d'hydratation.

MEMBRE DE
HOLCIM

APPLICATIONS RECOMMANDÉES

- Les fondations et les structures à réaliser dans un milieu agressif
- Les travaux maritimes
- Les stations de dessalement et d'épuration
- Les travaux hydrauliques
- Les barrages et les digues de soutènement collinaire



FORMULATION CONSEILLÉE

| | Ciment  | Sable (sec)  | Gravillons (sec)  | Eau (litres)  |
|--------------------------|--|---|---|--|
| Dosage pour béton C25/30 | X 1  | + X7  | + X5  + X4  | + 25 L |

Remarque: un bidon = 10 Litres

Formulation de béton à suivre dans le cas de l'absence d'une étude délivrée par un laboratoire"

CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES

• Analyses chimiques

| | Valeur |
|--------------------------------------|-----------|
| Perte au feu (%) (NA5042) | 0,5 à 3 % |
| Teneur en sulfates (SO3) (%) | 1,8 à 3 |
| Teneur en oxyde de magnésium MgO (%) | 1,2 à 3 |
| Teneur en Chlorures(NA5042) (%) | < 0,1 |

• Temps de prise à 20° (NA 230)

| | Valeur |
|----------------------|-----------|
| Début de prise (min) | > 60 |
| Fin de prise (min) | 240 à 400 |

• Composition minéralogique

| | Valeur |
|----------------------|--------|
| Taux d'aluminate C3A | <3.0% |

• Résistance à la compression

| | Valeur |
|----------------|--------|
| 2 jours (MPa) | ≥10 |
| 28 jours (MPa) | ≥42.5 |

• Propriétés physiques

| | 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 | <270j/g |

Ces valeurs sont données à titre indicatif et ne peuvent être considérées comme absolues

CONSIGNES DE SÉCURITÉ

1- PROTÉGEZ VOTRE PEAU : Portez les équipements adaptés dans vos chantiers: casques, lunettes, gants, genouillères, chaussures et vêtements de sécurité.

2- MANUTENTION : levez le sac en pliant les genoux et en gardant le dos droit.

MEMBRE DE
HOLCIM



Conditionnement:  / 

LAFARGE ALGÉRIE

Bureau n°02, 16ème étage, tour Geneva,
les Pins maritimes, Mohammadia, Alger.
tél: + 213 (0) 21 98 54 54
Fax: + 213 (0) 23 92 42 94
www.lafargealgerie.com
dz.satisfaction-clients@lafargeholcim.com
Tél: 021 98 55 55

LAFARGE
لافارج

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
جامعة غرداية

Faculté des Sciences et de la Technologie
Département Hydraulique et Génie Civil



كلية العلوم والتكنولوجيا
قسم العلوم والتكنولوجيا

Université de Ghardaïa

Filière : Génie Civil
Spécialité : Structures.

Autorisation d'impression d'un mémoire du Master

| Les membres du jury | Nom et prénom | Signature |
|----------------------|--------------------|-----------|
| Le président de jury | LAROUÏ Abdelbasset | |
| Examineur | SALHI Aimad | |
| Encadrante | DEHANE Sara | |

Je soussigné M^r : Laroui Abdelbasset

Président de jury des étudiants :

1. CHITOURA Amal
2. GUENZOUL Israa

Thème

Effet de l'incorporation de la pâte de ciment recyclée sur les propriétés du mortier

J'autorise les étudiants mentionnés ci-dessus d'imprimer et déposer leur manuscrit final au niveau du département.

Président de jury :

Le chef de département :