

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE ECHAHID HAMMA LAKHDAR D'ELOUED
FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT D'HYDRAULIQUE ET DE GENIE CIVIL



Mémoire de fin d'étude

Présenté par :

TRILLI SOUMAIA

SADANI ZAZIA

En vue de l'obtention du diplôme de **Master en Génie Civil** :

Filière : Génie Civil

Spécialité : Matériaux en Génie Civil

THÈME

**Etude expérimentale sur les caractéristiques et durabilité de
mortier à base des matériaux de constructions broyées
(Brique, déchet du béton)**

Encadreur : Dr. BEDADI Laid

Université EL OUED

Année Universitaire 2025/2026

Remerciements

Après avoir rendu grâce à Dieu le tout puissant et le miséricordieux . Nous tenons à remercions vivement notre promoteur Dr. Bedadi Laid pour l'aide précieuse qu'il nous a offert dans l'élaboration de ce travail. Nous remercions tous les membres du jury d'avoir accepté d'être les rapporteurs de notre mémoire.

Nous tenons à remercier sincèrement tout ce qui, de près ou de loin ont participé à la rédaction de ce document il s'agit plus particulièrement:

Responsable du laboratoire et professeurs du salon technologique

Enfin, on n'oserait oublier de remercierons chers parents et nos amies.

Dédicaces

Louange à Dieu qui nous a facilité les débuts, mené à bien les fins et permis d'atteindre nos objectifs.

Louange à Dieu, sans qui aucun effort ne s'accomplit et sans dont aucune œuvre ne s'achève.

Nous dédions le fruit de notre modeste travail à nos chers parents, à nos frères et sœurs, ainsi qu'à tous ceux avec qui nous avons partagé les bancs d'étude et le travail, et à tous nos amis et proches.

Dédicaces

À celle dont les prières ont été le secret de ma réussite, et dont la lumière éclaire mon chemin...

À ma chère mère, que Dieu lui accorde une longue vie et fasse de moi une source de fierté pour elle.

À celui qui m'a appris le sens de l'effort et de la patience, et qui a été mon soutien à chaque étape...

À mon cher père, que Dieu le protège.

À mes frères et sœurs, qui ont été à mes côtés à chaque instant, partageant mes joies et supportant mes absences.

À mon amie et mon soutien, Salsabil, qui a été à mes côtés à chaque étape, par son soutien sincère et ses paroles encourageantes ; je t'offre le fruit de mon travail en signe de reconnaissance et de gratitude.

À tous ceux qui m'aiment et m'ont soutenu(e), de près ou de loin, ne serait-ce que par une parole bienveillante ou une prière sincère.

À mes amis et camarades, qui m'ont accompagné(e) tout au long de ce parcours et ont été d'excellente compagnie.

Je dédie le fruit de mes modestes efforts, en espérant que Dieu nous accorde à tous réussite et succès

Dédicaces

À mes piliers de vie, ma mère et mon père, ainsi qu'à ma famille, je dédie ce modeste travail, fruit de votre soutien infaillible.

Aux âmes pures de mes grands-parents décédés, et à ma chère grand-mère, que Dieu lui prête longue vie, vos prières ont été la clé de ma réussite.

À mes fidèles amies, mes compagnes de route qui ont rendu ce parcours académique plus beau par leur présence et leur soutien.

Je vous dédie à tous cet accomplissement en reconnaissance de votre amour, car vous êtes les véritables partenaires de ma joie en ce jour de graduation

Signé : soumaia

RESUME

Cette étude expérimentale porte sur la valorisation des déchets de construction (béton et brique) dans la composition des mortiers. L'objectif est de substituer le ciment par de la poudre de béton recyclé à des taux de 10 %, 20 % et 30 %, tout en comparant ces formulations à un mortier témoin. Cette démarche vise à réduire les déchets, préserver les ressources naturelles et améliorer la durabilité des structures. Le protocole expérimental a utilisé au total 234 éprouvettes prismatiques de dimensions 4x4x16 cm, réparties comme suit : 156 pour les essais de compression, de flexion et de vitesse ultrasonique et 39 pour les essais de retrait et pour les essais d'absorption d'eau par capillarité. Les résultats démontrent que, le mortier modifié à base de résidus de briques a donné des résultats satisfaisants malgré une résistance mécanique conventionnelle, le mortier modifié présente des performances supérieures en termes de retrait et de propagation ultrasonique, le rendant particulièrement avantageux pour des applications exigeant une haute durabilité et stabilité structurelle.

Mots-clés

Mortier, Déchets de Brique, et béton , Compression, flexion, Ultrasons, Absorption capillaire, Retrait.

ABSTRACT

This Works presents an experimental study on the composition and properties of mortar made from construction waste (brick powder and concrete residue) used as an additive to cement. The study investigates substitution ratios of 10%, 20%, and 30%, in addition to water, cement, and sand. These mixtures were compared to an ordinary mortar. The main objective of this research is to valorize construction waste as mortar additives, given their massive availability in nature, in order to reduce waste, preserve natural resources, and improve the durability of the mortar. In this study, we used 180 prismatic specimens (4x4x16 cm) for compression, flexural, and ultrasonic tests, 36 specimens for shrinkage tests, and 36 specimens for capillary water absorption tests. The results indicate that the modified mortar made from brick waste achieved satisfactory results. Despite having conventional mechanical resistance, the modified mortar exhibited superior performance in terms of shrinkage and ultrasonic propagation, making it particularly useful for construction applications requiring high durability and structural stability.

Keywords: Mortar, Brick waste, Concrete residue, Compression, Flexural strength, Dimensional changes, Ultrasound, Capillary water absorption, Shrinkage

هذا العمل يشمل دراسة تجريبية حول تركيبة وخصائص الملاط المصنوعة من بقايا مواد البناء مسحوق الأجر، وبقايا الخرسانة و نسب إضافتها للإسمنت على النحو التالي بالنسب 10% و 30% و 20% وماء و الإسمنت والرمل و تمت مقارنتها بملاط العادية الهدف الرئيسي من هذا البحث هو تثمين نفايات مواد البناء كإضافات للملاط بناءً على توافر هائل لهذه المواد في الطبيعة، ولتقليل النفايات وللحفاظ على الموارد الطبيعية وتحسين خصائص متانة الملاط، في در استنا استخدمنا 180 قالباً موشور (4x4 x16سم) لاختبارات الضغط والانحناء والموجات فوق الصوتية، و 36 قالباً الشكل لاختبارات الانكماش و 36 قالباً لاختبار امتصاص الماء بالخاصية أظهرت النتائج أن الملاط المعدل المصنوع من مخلفات الطوب حقق نتائج مرضية رغم امتلاكه قوة ميكانيكية تقليدية. يتميز الملاط المعدل بأداء فائق من حيث الانكماش وانتشار الموجات فوق الصوتية، مما يجعله مفيداً بشكل خاص للتطبيقات التي تتطلب متانة عالية واستقراراً هيكلياً

الكلمات المفتاحية: الملاط الأجر بقايا الخرسانة الضغط الشد بالانحناء التغير في الأبعاد الموجات فوق الصوتية امتصاص الماء بالخاصية الشعرية الانكماش

Liste des Figures

Liste des Figures

Chapitre I :Etude Bibliographique sur le mortier

Figure I.1. Ingrédients du mélange de mortier.....	22
Figure I.2. Nomenclature du ciment.....	24
Figure I.3. déchet de béton	28
Figure I.4 .déchet de briques.	29
Figure I.5 .Coupe de toiture.....	30
Figure I.6. Coupe de mur en briques creuses.....	32
Figure I.7. Consistance du mortier sur la table vibrante.....	33
Figure I.8. Principe de fonctionnement du maniabilimètre.....	34
Figure I.9. Schéma d'une machine de concassage à flexion.....	34
Figure I.10. Il explique le mécanisme de l'écrasement par compression.....	34
Figure I.11. Dispositif d'essai de compression.....	35
Figure I.12. appareil de mesure du retrait	36
Figure I.13 Effet du rapport E/C sur la résistance à la flexion.....	38
Figure I.14. Influence du rapport E/C sur la résistance à la compression.....	38
Figure I.15. Effet du rapport eau/ciment (E/C) sur la profondeur de la couche de carbonatation au fil du temps.....	42

Chapitre II : Méthode de formulation et essais

Figure II. 1. Quantités de matériaux utilisés dans le mélange.....	48
Figure II.2 Explication du tableur et des mesures opérationnelles.....	50
Figure II. 3 Expliquez le processus de mélange.	51
Figure II. 4 Le processus de moulage est expliqué.....	51
Figure II.5. Des échantillons pleines	51
Figure II. 6. Échantillons dans l'air	52
Figure II. 7. Échantillons dans l'eau	53
Figure II. 8 . Dispositif de vitesse d'impulsion ultrasonique	55
Figure II.9.Le processus de mesure du retrait est expliqué.....	55
Figure II.10. Expliquez le processus de Flexion	56
Figure II.11. illustre le processus de broyage par pression.....	57

Chapitre III : Propriétés des matériaux utilisés

Figure III.1. L'image montre la masse volumétrique apparente.....	61
Figure III.2. L'image montre la masse volumétrique absolue.....	62
Figure III.3. Tube gradué spécial pour essai d'équivalence de sable.....	63
Figure III.4. L'expérience avec l'équivalent de sable et la machine vibrante illustre. 64	
Figure III.5 Expérience de gradient granulaire.	65
Figure III.6 Explication du sable coincé dans les tamis.....	65
Figure III.7 courbe granulométrie du sable utilisé.....	66
Figure III.8 Ciment.....	68
Figure III.9. déchets de brique.....	68

Figure III.10. Diagramme d'analyse de (DRX) sur Poudre de Brique.....	69
Figure III.11. déchets de béton.....	70
Figure III.12. Diagramme d'analyse de (DRX) sur Poudre de Déché de Béton	71

Chapitre IV : Interprétations, Résultats et Courbes

Figure IV.1. Courbe de la résistance à la flexion en fonction des temps.....	77
Figure IV.2. Courbe de résistance à la flexion en fonction des temps.....	78
Figure IV.3. Courbe de résistance à la flexion en fonction des temps Bc.....	79
Figure IV.4. Courbe de résistance à la flexion en fonction des temps Brc.....	80
Figure IV.5. La courbe comparative de la résistance à la flexion illustre les mortiers B..	81
Figure IV.6. Courbe comparative de la résistance à la flexion en fonction des temps Br et Brc.....	81
Figure IV.7. Courbe de la résistance à la compression en fonction des temps Br.....	83
Figure IV.8. Courbe comparative de la résistance à la compression en fonction des temps Brc.....	84
Figure IV.9. Courbe de la résistance à la compression en fonction des temps Bc.....	85
Figure IV.10. Courbe de la résistance à la compression en fonction des temps B	86
Figure IV.11. Courbe comparative de la résistance à la compression en fonction des temps B et Bc.....	87
Figure IV.12. Courbe comparative de la résistance à la compression en fonction des temps Brc et Br.....	88
Figure IV.13. Courbe de retrait illustre les en fonction des tempsB	90
Figure IV.14. Courbe de retrait illustre les en fonction des tempsBc.....	91
Figure IV.15. Courbe de retrait illustre les en fonction des tempsBr	92
Figure IV.16. Courbe de retrait illustre les en fonction des tempsBrc.....	93
Figure IV.17. Courbe comparant les résultats de retrait en fonction des temps Br et Brc..	94
Figure IV.18. Courbe comparant les résultats de retrait en fonction des temps B et Bc ...	95
Figure IV.19. Courbe illustre les résultats concernant la vitesse de propagation en fonction des temps de Brc	96
Figure IV.20. Courbe illustre les résultats concernant la vitesse de propagation en fonction des temps de Br	98
Figure IV.21. Courbe comparant les résultats de retrait en fonction des temps B et Bc illustre Courbe illustre les résultats concernant la vitesse de propagation en fonction des temps de Bc.....	100
Figure IV.22. Courbe illustre les résultats concernant la vitesse de propagation en fonction des temps de B.....	101
Figure IV.23. Courbe illustre les résultats d'absorption en fonction des temps de Bc et B.....	104
Figure IV.24. Courbe illustre les résultats d'absorption capillaire en fonction des temps de Br et Brc.....	106

Liste des Tableaux

Liste des Tableaux

Chapitre II : Méthode de formulation et essais

Tableau II.1. Composants du mortier.....	48
Tableau II.2. Composants du mortier 1 m.....	48
Tableau II.3. Tableau de qualité du mortier.....	50

Chapitre III : Propriétés des matériaux utilisés

Tableau III.1. Il présente les résultats de la masse volumétrique.....	49
Tableau III. 2. Tableau des résultats de l'analyse granulométrique du sable de ...	66
Tableau III.3. Il présente les résultats de la Module de finesse.....	67
Tableau III.4. Composition chimique du déchet de brique broyé.....	69
Tableau III.5. Quelques caractéristiques de déchet de brique broyé.....	70
Tableau III.6. Composition chimique du déchet de béton broyé.....	71
Tableau III.7. Quelques caractéristiques de déchet de béton broyé.....	72
Tableau III.8. La masse volumique apparente et absolue de déchets.....	72

Table des matières

RESUME.....	5
ABSTRACT.....	6
ملخص.....	7
INTRODUCTION GENERALE.....	17
But du projet d'étude.....	17
Chapitre I : Etude Bibliographique sur le mortier	
I.1. Introduction.....	20
I.2. Définition du mortier	21
I.3. Composants de base du mortier	21
I.3. 1 . Le liant (liants hydrauliques et non hydrauliques(.....	21
I.3.2. Le granulat fin (sable(.....	21
I.3.3. L'eau.....	22
I.4.	Mati
ères inertes	22
I.5. L'eau.....	23
I.6. Les liants.....	23
I.6.1. Ciment Portland ordinaire.....	23
I.6.2. La chaux	24
I.6.3. Les ajouts liants secondaires (matières pouzzolaniques).....	24
I.7. Mise en forme du mortier	25
I.8. Les adjuvants.....	26
I.8. 1. Adjuvants chimiques	26
I.8. 2. a . Poudre de résidus de béton (RCP(.....	27
I.8. 2. b . Poudre de brique (grog / poussière de brique)	28
I.9. Types de mortier.....	29
I.10. Utilisations du mortier.....	30
I.11. Propriétés du mortier.....	31
I.12. Ouvrabilité selon la norme NFP18-452.....	32
I.12. a. Essai à la table à secousses.....	32
I.12. b. . Essai au maniabilimètre (LCPC).....	32
I.13. Essai de rupture par flexion (ou résistance à la traction par flexion)	33
I.14. Essai de rupture par compression (résistance à la compression.....	34
I.15. Le retrait.....	35
I.16. le vitesse de propagation des impulsions ultrasonores (UPV)	36
I.17. d'absorption capillaire.....	36
I.18. Effet du rapport E/C sur la résistance.....	37
I.19. La durabilité.....	38
I.20. Hydratation du ciment.....	39
I.20. 1. Période avant prise (période dormante)	39
I.20. 2. Période de prise.....	39
I.20. 3 Période de durcissement.....	39
I.21. Hydratation de l'aluminate tricalcique C ₃ A.....	39

I.22.Hydratation des silicates de calcium (C_3S et C_2S).....	40
I. 23.Hydratation du composé C_4AF (aluminoferrite tétracalcique)	40
I.24.Action des éléments chimiques nuisibles.....	41
I.25.Éléments affectant de la durabilité du mortier.....	41
I.26. Facteurs influençant le processus de corrosion du mortier.....	42
I.27. Mécanisme d'action des sulfates SO_4^{2-} - Détail important.....	43
I.28.Conclusion.....	44
I.29. Conclusion finale	45

Chapitre II : Méthode de formulation et essais

II.1.Introduction.....	47
II.2.Préparation du mortier.....	47
II.2.1.Formulation du mortier	47
II.2. 2. Ouvrabilité NF P 18-452.....	49
II.2. 2. 1.Principe de l'essai.....	49
II.2. 2. 2.Description de l'appareil.....	50
II.2. 3.Moulage (Préparation des éprouvettes(.....	50
II.2. 4. Étapes de préparation du moulage.....	50
II. 3. Méthodes d'essais sur les éprouvettes	52
II. 3. A. des essais non destructifs.....	52
II.3. A.1. Essai d'absorption d'eau par capillarité.....	52
II.3. A.2. Les ultrasons dans le béton.....	53
II. 3. A.3. Essai de retrait (retrait linéaire (.....	55
II.3. B. Les essais destructifs	55
II 3. B.1.Essai de flexion.....	55
II.3. B.2.Expérience d'écrasement par pression.....	56
II.4. Conclusion.....	57

Chapitre III : Propriétés des matériaux utilisés

III.1.Introduction	60
III .2. Le sable.....	60
III. 2. 1. La masse volumique.....	61
III.2.1.1. masse volumique apparent.....	61
III.2.1.2 Masse volumique Absolue.....	62
III.2.2. Essai de l'Équivalent de Sable (ES(.....	63
III.1.2. a. Principe de l'essai.....	63
III.2.2. b. Étapes de l'expérience.....	63
III -2-2. c. Résultats obtenus.....	64
III.2.3. Analyse Granulométrique.....	64
III.2.3. 1.Outils utilisés	64
III.2.3. 2.Étapes de l'expérience.....	64
III.2.4. Module de Finesse (Mf).....	66
III.3. L'Eau.....	67
III.4. Le Ciment.....	67
III.5. Les déchets de brique.....	68
III.6. Les déchets de béton.....	70
III.6.1. La masse volumique de déchrts	72
III.7. Conclusion du Chapitre.....	80

Chapitre IV : Interprétations, Résultats et Courbes

IV.1. Entrée.....	75
IV.2.Comportement du mortier à l'état frais.....	75
IV.2.1. Maniabilité (Workability).....	75
IV.3.Comportement du mortier à l'état solide.....	76
IV.3.1. Résistance à la flexion.....	76
IV.3.2. Résistance à la Compression.....	82
IV.3.3. Mesure du retrait.....	89
IV.3.4. Mesure de la vitesse de propagation du son.....	96
IV.3.5. Mesure de l'absorption par capillarité.....	103
Conclusion générale.....	110
DE référence.....;;	113

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Contexte du projet d'étude

L'apparition du mortier a représenté l'une des avancées les plus révolutionnaires de l'histoire de l'ingénierie et de la construction. Depuis son invention, le mortier joue un rôle pivot dans la création d'infrastructures durables et l'édification d'innombrables monuments architecturaux emblématiques à travers le monde. Sa flexibilité, sa durabilité et sa résistance en ont fait un pilier fondamental du secteur du bâtiment.

La consommation mondiale de mortier est colossale ; des quantités massives sont utilisées chaque année dans des projets de toutes envergures, allant des simples trottoirs aux gratte-ciel les plus complexes. Cette demande constante a stimulé la recherche et le développement continu dans ce domaine, menant à l'émergence de nouveaux types de mortiers dotés de propriétés améliorées, de performances supérieures et d'une plus grande longévité.

Parmi ces innovations, le mortier constitue un progrès majeur. Il est conçu pour la liaison des unités de maçonnerie, l'enduisage, le jointoiement, la pose de carrelage, le nivellement des surfaces et les travaux de rénovation, ce qui en fait un matériau indispensable dans les travaux de construction. Cette polyvalence le positionne comme un composant essentiel dans le domaine du béton.

Dans cette mémoire, nous avons utilisé des déchets de matériaux de construction comme additifs au ciment.

Objectif de la recherche

Cette recherche vise principalement à démontrer la faisabilité de l'utilisation des déchets de construction (poudre de brique, et de béton) comme additifs pour le mortier. Elle a également pour objectifs de valoriser les matériaux disponibles, de réduire les déchets, de préserver les ressources naturelles et d'améliorer les propriétés

physiques et mécaniques du mortier'produit.

Cette mémoire s'articule autour de quatre chapitres : Le premier chapitre concernent la partie théorique étude bibliographique sur le mortier où sont traités l'ensemble des paramètres ayant trait aux constituants élémentaires des mélanges et les caractéristiques mécaniques et rhéologiques des mortier. Dans le et le deuxième chapitre intitulé caractéristiques des matériaux utilisées, et le troisième chapitre consacré sur Méthode de formulation et essais. nous présentons les constituants utilisés dans la formulation du béton de sable, ainsi que les différentes méthodes destinées à la caractérisation physique, mécanique et rhéologique des constituants et des mortier. Le quatrième et le dernier chapitre est consacré aux résultats et discussion de l'ensemble des propriétés physiques, mécaniques et rhéologiques des mortier. Enfin, on terminera par une conclusion générale suivie des recommandations et perspectives.

Chapitre I: Etude bibliographique sur le mortier

I.1. Introduction

Le mortier est considéré comme l'une des plus anciennes innovations connues des civilisations humaines. Depuis l'Antiquité, l'homme utilisait de l'argile mélangée à de la paille pour lier les pierres. Par la suite, les Sumériens en Mésopotamie ont découvert les propriétés de la chaux et du bitume. Ils furent suivis par les Égyptiens, qui ont excellé dans l'utilisation du mortier de gypse pour la construction des pyramides et l'assemblage de leurs blocs massifs. Plus tard, les Romains ont révolutionné la construction en inventant le « mortier pouzzolanique », en mélangeant des cendres volcaniques avec de la chaux, ce qui a permis aux structures de résister pendant des milliers d'années.

À l'époque moderne, le mortier a évolué pour devenir un matériau d'ingénierie précis, composé d'un liant (comme le ciment) et d'un granulat fin (comme le sable). Il joue un rôle essentiel en tant qu'élément de liaison assurant la stabilité des structures et la cohésion de leurs composants. Il passe d'un état plastique, facilement maniable, à une masse solide et résistante capable de supporter les contraintes mécaniques et les conditions environnementales.

L'importance de ce matériau réside dans sa capacité à répartir uniformément les contraintes entre les éléments de construction, empêchant ainsi la fissuration des murs et limitant la pénétration de l'eau. Aujourd'hui, le mortier connaît une évolution vers la durabilité grâce à l'intégration d'additifs innovants et de déchets industriels recyclés, visant à améliorer ses performances mécaniques et environnementales. L'étude du comportement du mortier, depuis les réactions chimiques initiales lors de l'ajout d'eau jusqu'à la phase finale de durcissement, constitue une base essentielle en génie civil pour assurer la durabilité des ouvrages. Ainsi, malgré la simplicité apparente de ses composants, le mortier reste un matériau complexe et fondamental dans l'histoire de l'architecture et la stabilité des structures. [1]

I.2. Définition du mortier

Le mortier est un matériau composite constitué principalement de trois composants : le ciment en tant que liant, le sable en tant que phase granulaire, et l'eau en tant que

phase liquide. Après le mélange, le mortier passe par deux étapes principales : une phase plastique, durant laquelle il est facilement malléable et utilisable, suivie d'une phase durcie où il acquiert sa résistance mécanique. À l'échelle microscopique, le mortier durci est composé de plusieurs éléments, dont le principal est le gel de silicate de calcium hydraté (C-S-H), responsable de la résistance mécanique du matériau. On y trouve également des cristaux d'hydroxyde de calcium Ca(OH)_2 , ainsi que des pores internes qui influencent directement la durabilité du mortier et ses propriétés physiques et mécaniques. [2]

I.3 . Composants de base du mortier

I.3. 1 . Le liant (liants hydrauliques et non hydrauliques)

C'est la matière qui réagit avec l'eau et se solidifie, et qui agit en liant les grains de granulat entre eux. Les plus connus sont :

- **Ciment Portland ordinaire (CPO)** : Le plus courant, caractérisé par une grande force de cohésion et une prise rapide.
- **Chaux hydraulique** : Fait prise à l'air et sous l'eau, utilisée dans les restaurations et les travaux traditionnels.
- **Chaux aérienne (éteinte)** : Ne fait prise qu'à l'air par absorption du CO_2 , utilisée dans les anciens mortiers de chaux.
- **Plâtre** : Utilisé uniquement pour les travaux intérieurs car il ne résiste pas à l'humidité.
- **Ciment mélangé** : Contient des ajouts pouzzolaniques (tels que cendres volantes ou laitier) pour améliorer les propriétés et réduire le coût.

I.3. 2 . Le granulat fin (sable)

C'est le matériau inerte le plus utilisé. Le sable doit être propre (exempt de sels, matières organiques et argile), et avoir une granularité étalée (granulométrie variée) afin de produire une pâte dense avec peu de vides. La dimension maximale des grains de sable dans le mortier est généralement de 4-5 mm. Types de sable :

- **Sable de rivière ou de mer (doit être lavé du sel).**

- **Sable de carrière (concassé industriel).**

I.3. 3. L'eau

Doit être une eau propre, potable (exempte d'huiles, d'acides et de matières organiques). Elle est utilisée pour le processus d'hydratation et pour obtenir l'ouvrabilité. La quantité d'eau affecte significativement la résistance du mortier : un excès d'eau augmente l'ouvrabilité mais réduit la résistance et la durabilité et augmente le retrait.

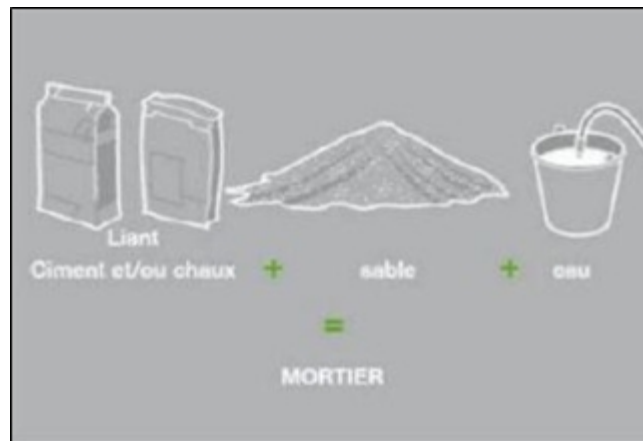


Figure I. 1:Ingrédients du mélange de mortier

I.4. Matières inertes

Les matières inertes sont des grains fins qui ne participent pas chimiquement à la réaction d'hydratation (ou très lentement), mais qui augmentent le volume, améliorent l'ouvrabilité et réduisent le coût. Leurs exemples :

Poussière de pierre (farine de pierre) : issue du concassage et du criblage des granulats.

Poussières fines : mais il faut se méfier d'un excès d'argile.

Pouzzolanes naturelles : comme la terre d'infusoires et la pierre ponce volcanique (réagissent lentement avec la chaux).

Résidus de briques et poudre de béton.

Différence entre matières inertes et adjuvants : L'inerte ne modifie pas significativement les propriétés du mélange sauf en grandes quantités, alors que les adjuvants sont ajoutés en très faibles proportions pour modifier des propriétés

spécifiques.

I.5. L'eau

En plus d'être le milieu d'hydratation, l'eau confère au mortier la plasticité nécessaire à sa mise en œuvre. La qualité et le rapport eau/liant (rapport E/C) affectent à la fois :

- **L'ouvrabilité** : Plus d'eau = pâte plus facile à étaler et à projeter, mais elle a tendance à la fluidité et à la ségrégation des grains.
- **Le temps de prise** : L'eau accélère l'hydratation jusqu'à un certain point, puis la retarde si elle est excessive.
- **La porosité** : L'excès d'eau s'évapore en laissant des vides qui affaiblissent le mortier.
- **La durabilité** : Une eau appropriée donne une hydratation complète sans faiblesse.

Le rapport E/C (eau/ciment) idéal pour le mortier se situe généralement entre 0,5 et 0,8 selon l'application, le type de ciment et les conditions de mise en œuvre. [3]

I.6. Les liants

I.6.1. Ciment Portland ordinaire

Il est composé de clinker de chaux, silice, alumine et oxyde de fer. Lors de l'ajout d'eau, ses composés (C_3S , C_2S , C_3A , C_4AF) commencent à s'hydrater pour former un gel adhésif appelé silicate de calcium hydraté (C-S-H) ainsi que des cristaux de Portlandite ($Ca(OH)_2$).

- **Avantages** : Résistance initiale élevée, largement disponible, durable dans des conditions normales.

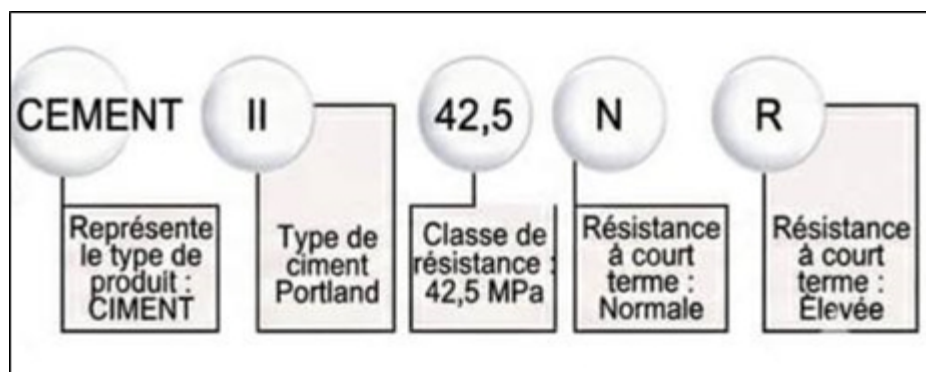


Figure I.2: Nomenclature du ciment

- **Inconvénients** : Sensible aux sulfates et à l'eau salée, dégage une chaleur d'hydratation élevée.

I.6.2. La chaux

Elle est souvent utilisée avec le ciment pour assouplir le mortier (mortier de chaux et ciment). Ou utilisée seule dans les mortiers de chaux traditionnels. La chaux se distingue par sa capacité d'autocicatrisation (réparation des petites fissures), une haute perméabilité à la vapeur et une durabilité contre les sels.

Types courants de chaux pour mortier :

- Chaux vive (CaO) : Doit être éteinte avant utilisation.
- Chaux éteinte (Ca(OH)_2) : Prête à être mélangée.
- Pâte de chaux : Chaux éteinte et stockée sous l'eau.

I.6.3. Les ajouts liants secondaires (matières pouzzolaniques)

Ces matières ne possèdent pas de propriété liante par elles-mêmes, mais elles réagissent avec la chaux libre issue de l'hydratation du ciment pour former des composés liants supplémentaires (similaires au C-S-H). Ceci améliore la résistance et la durabilité et réduit la perméabilité.

- **Poudre de résidus de béton** : Produite par broyage de déchets de béton ancien après séparation des gros granulats. Cette poudre contient des minéraux de ciment partiellement hydratés (C-S-H, Ca(OH)_2 , grains de sable fin, et un peu de clinker non hydraté). Lorsqu'elle est ajoutée au mortier frais, les grains de ciment non hydraté qu'elle contient se réactivent. Plus important encore, la chaux libre (Ca(OH)_2) dans le vieux béton peut réagir avec la silice présente dans le sable (en présence d'eau) pour former des liaisons supplémentaires (effet pouzzolanique). De plus, les particules très fines améliorent le compactage granulaire (augmentation de la densité), ce qui réduit les vides. Cependant, il faut se méfier des contaminants dans le béton recyclé (sulfates, chlorures) qui pourraient nuire à la durabilité. La proportion autorisée est généralement de 10-20% du poids du ciment.

· **Poudre de brique** : La brique (rouge) est fabriquée à partir d'argile cuite. Lorsqu'elle est cuite à des températures modérées (entre 500 et 900°C), l'argile devient pouzzolaniquement active. La vieille brique moulue (brique traditionnelle ou « komtoura ») était utilisée depuis l'époque romaine en ajout dans les mortiers et bétons. La composition chimique de la brique est riche en silice (SiO_2) et alumine (Al_2O_3) actives, qui réagissent avec la chaux libre ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) issue de l'hydratation du ciment en présence d'eau pour former des silicates et aluminates de calcium hydratés (C-S-H et C-A-H), des liaisons supplémentaires qui donnent de la résistance à l'eau et aux sulfates. L'ajout de poudre de brique améliore :

· La résistance du mortier aux sulfates (car il consomme la chaux libre avec laquelle les sulfates réagissent pour former du gypse, cause de gonflement et de détérioration).

· Réduit la perméabilité.

· Donne une couleur rouge terreux caractéristique.

· Augmente la résistance à long terme.

· Proportion d'utilisation courante : jusqu'à 30% comme substituant partiel du ciment.

Résumé sur les ajouts (poudre de béton et de brique) : Ces deux matières sont considérées comme des adjuvants minéraux actifs ou des pouzzolanes artificielles. Leur ajout au mortier apporte des bénéfices environnementaux (recyclage des déchets) et techniques (amélioration de la résistance chimique et mécanique à long terme). Cependant, il faut contrôler soigneusement la proportion optimale, car un excès peut réduire la résistance initiale et augmenter la demande en eau.

I.7. Mise en forme du mortier

Le processus de mise en forme du mortier passe par des étapes : mélange à sec (pour mélanger le liant et le sable), puis ajout progressif de l'eau avec malaxage continu jusqu'à homogénéisation de la pâte. Méthodes de mise en forme :

· **Manuellement** : À la truelle et au baquet, adapté aux petits travaux.

· **Mécaniquement** : Au moyen de malaxeurs à mortier rotatifs ou à axe vertical. Un bon malaxage est nécessaire pour obtenir une pâte homogène.

- **Par projection (enduit) :** Le mortier est appliqué sur le mur avec force à la truelle ou par projection.
- **Remplissage (jointoiement) :** Dans les joints de maçonnerie entre blocs ou briques, le mortier est appliqué puis l'élément supérieur est pressé pour faire sortir l'excédent.
- **Finition :** La surface est lissée et rendue plane après le début de la prise (prise partielle).

La température affecte la vitesse de prise ; par temps chaud, il faut humidifier les surfaces et ombrager le mortier, et par temps froid, utiliser de l'eau tiède et des adjuvants antigel.

I.8. Les adjuvants

Les adjuvants chimiques et minéraux sont des matières ajoutées au mélange du mortier en très faibles proportions (généralement moins de 5% du poids du ciment pour les chimiques, ou plus pour les minéraux) pour modifier les propriétés du mélange à l'état frais ou durci.

I.8.1. Adjuvants chimiques

- **Plastifiants et superplastifiants :** Réduisent la quantité d'eau nécessaire à l'ouvrabilité, augmentant ainsi la résistance et améliorant la finition.
- **Entraîneurs d'air :** Améliorent la résistance au gel-dégel et augmentent l'ouvrabilité.
- **Accélérateurs de prise :** Accélèrent le durcissement (ex : chlorure de calcium, mais il provoque la corrosion du fer).
- **Ralentisseurs de prise :** Prolongent le temps de prise par temps chaud ou pour les longs trajets.
- **Adjuvants polymères :** Tels que SBR ou acrylique, augmentent l'adhérence et la flexibilité (pour les primaires et matériaux de réparation).
- **Réducteurs de retrait.**
- **Hydrofuges :** Remplissent les pores capillaires.

I.8.2. Adjuvants minéraux

I.8.2. a . Poudre de résidus de béton (RCP) :

Source : Issue du concassage et du broyage du béton issu de démolition, puis tamisée pour obtenir des grains plus fins que 150 microns.

- **Composition :** Mélange de ciment partiellement hydraté, sable fin, minéraux argileux, et parfois carbonate de calcium.
- **Mécanisme d'action :**
 - **Compactage granulaire :** Ses particules ultrafines remplissent les vides entre les grains de ciment et de sable, augmentant la densité et réduisant la demande en eau.
 - **Réaction pouzzolanique (limitée) :** Si un peu de chaux libre reste ou si de la chaux supplémentaire est ajoutée, une partie de la silice active dans la poudre réagit avec elle.
 - **Nucléation :** Les petites particules fournissent des sites pour la cristallisation des nouveaux produits d'hydratation, accélérant ainsi la réaction précoce.
 - **Effets :** Amélioration de la résistance à moyen terme (28-90 jours), réduction de la perméabilité, utilisation durable. Cependant, il peut réduire la résistance à la compression précoce (3-7 jours) jusqu'à 10-30% du ciment[8].



Figure I.3: déchet de béton

I.8.2. b . Poudre de brique (grog / poussière de brique) :

- **Source :** Brique rouge cuite à des températures moyennes (500-900°C) – car une

température trop élevée (plus de 1000°C) détruit l'activité pouzzolanique en transformant la silice et l'alumine en minéraux cristallins inertes (mullite).

- **Composition :** SiO_2 (60-70%), Al_2O_3 (10-20%), Fe_2O_3 (5-10%) sous forme amorphe (vitreuse), ce qui est la clé de l'activité.
- **Mécanisme d'action :** Effet pouzzolanique puissant.
- Lors de l'ajout de poudre de brique au mortier, elle réagit avec la chaux libre (Ca(OH)_2) produite par l'hydratation du ciment.
- **Réactions :**
 - $\text{Ca(OH)}_2 + \text{SiO}_2 \text{ (active)} \rightarrow \text{C-S-H (gel liant)}$.
 - $\text{Ca(OH)}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 \text{ (active)} \rightarrow \text{C-A-H (autres composés liants)}$.
- La consommation de la chaux libre (qui rend le mortier friable et sensible aux sulfates) améliore significativement la résistance du mortier à l'attaque sulfatique. Le C-S-H produit remplit les pores et réduit la perméabilité.
- **Autres effets :** Donne une couleur brun rougeâtre (esthétique pour la restauration), améliore la résistance à l'eau salée, augmente la résistance à long terme (plus de 90 jours), mais ralentit légèrement le temps de prise et peut réduire la résistance à la compression précoce si la proportion dépasse 10-30%. [4]

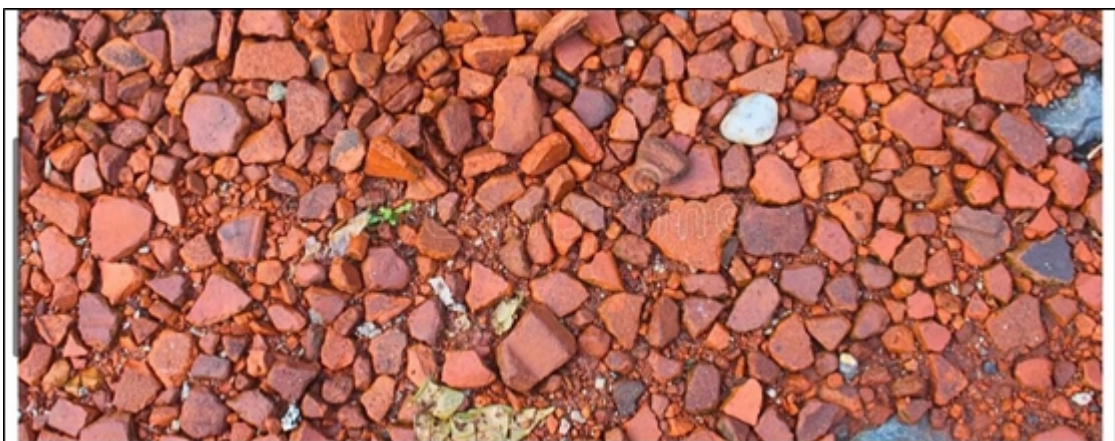


Figure I.4: déchet de briques

I.9. Types de mortier

On peut classer les mortiers selon le liant, l'usage et le dosage :

- . **Mortier de ciment** : Ciment + sable + eau, dosage 1/3 à 1/6 (ciment/sable). Résistant, peu flexible, prise rapide, utilisé pour les fondations et les charges lourdes.
- . **Mortier de chaux** : Chaux + sable + eau, dosage 1/3. Faible, très flexible, prise lente, perméable à la vapeur, utilisé en restauration.
- . **Mortier mixte (chaux et ciment)** : Ciment + chaux + sable + eau. Combine la résistance du ciment et la flexibilité/plasticité de la chaux, type de mortier le plus utilisé dans les bâtiments résidentiels (murs porteurs et enduits).
- . **Mortier de plâtre** : Plâtre + sable fin, utilisé uniquement en intérieur pour plafonds et cloisons sèches, ne résiste pas à l'humidité.
- . **Mortier de pouzzolane** : Contient des cendres volantes, du laitier de haut fourneau ou de la poudre de brique, utilisé pour les grands projets ou la résistance à l'eau.
- . **Mortier réfractaire** : Résiste aux hautes températures, contient de l'argile réfractaire et des sables spéciaux.
- . **Mortier de polymère** : Auquel on ajoute des polymères adhésifs, haute adhérence et durabilité pour les réparations. [4] [5]

I.10. Utilisations du mortier

- **Maçonnerie de murs en brique et pierre** : Couche de liaison entre les éléments. On préfère ici un mortier relativement faible (mixte) pour supporter les mouvements sans se fissurer.
- **Enduit intérieur et extérieur** : Couches de mortier pour couvrir et niveler les murs. La première couche (corps d'enduit) est rugueuse, la couche de finition est lisse.
- **Chapes de nivellement des sols** : Sous le carrelage ou la céramique, on utilise un mortier résistant (ciment ou ciment avec sable grossier) d'épaisseur parfois 3-5 cm.
- **Jointoiement (joints entre carreaux)** : Mortier fin, flexible et résistant à l'eau.
- **Fixation des semelles et équipements** : Scellement des semelles de fondation ou

des goudjous d'ancrage.

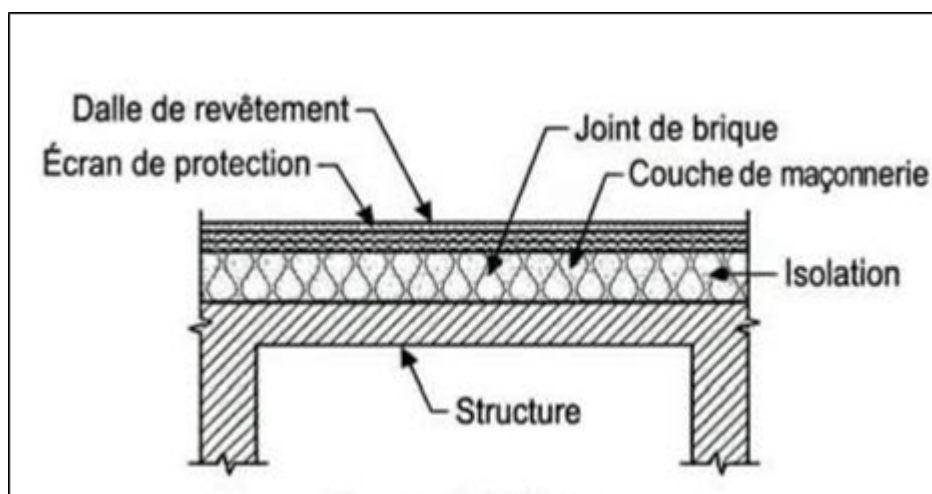


Figure I.5: Coupe de toiture

- **Travaux de réparation et restauration** : Traitement des fissures et revêtement des surfaces endommagées avec un mortier adhésif spécial.
- **Gobetis (projection primaire)** : Mortier liquide projeté sous pression sur un mur rugueux pour le préparer à l'enduit.
- **Mortier hydrofuge (dans les réservoirs et canaux)** : Contient des adjuvants ou du ciment résista

nt aux sulfates.

- **Mortier réfractaire** pour les cheminées.

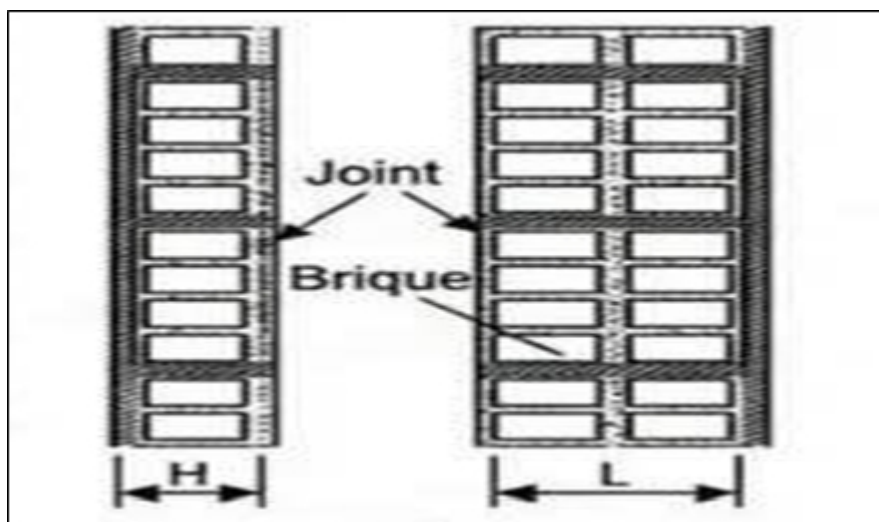


Figure I.6: Coupe de mur en briques creuses

I.11. Propriétés du mortier

Propriétés requises pour un bon mortier:

Ouvrabilité : Facilité à l'étaler et à le mettre en œuvre sans fluidité excessive ni sécheresse.

- **Rétention d'eau** : Ne pas perdre rapidement son eau lorsqu'il est appliqué sur une surface poreuse (brique, pierre).
- **Temps de prise approprié** : Ni trop rapide (pour finir le travail) ni trop lent.
- **Résistance mécanique** : Résistance suffisante à la compression et à la traction selon l'application.
- **Adhérence** : Non-décollement du mortier de la surface après séchage.
- **Flexibilité** : Capacité à supporter les mouvements mineurs du bâtiment sans se fissurer.
- **Perméabilité** : Faible pour empêcher l'infiltration d'eau, ou moyenne (pour la chaux) pour permettre l'évaporation de l'humidité.
- **Durabilité** : Résistance aux facteurs de détérioration (gel-dégel, sulfates, humidité, sels).
- **Retrait** : Faible, car un retrait élevé provoque des fissures. [6]

I.12.Ouvrabilité selon la norme NFP18-452

La norme NFP18-452 est une norme française qui décrit la méthode de mesure de l'ouvrabilité (ou plasticité) du mortier. Elle définit deux essais principaux :

I.12.a. Essai à la table à secousses : Le mortier est placé dans un moule conique sur une table métallique, le moule est retiré, puis la table est secouée 15 fois. On mesure l'étalement de la pâte (diamètre du galet). L'écoulement (Flow) = (diamètre final / diamètre initial) × 100. Les valeurs d'écoulement idéales se situent entre 140 et 180% pour le mortier ordinaire. [7] [8]

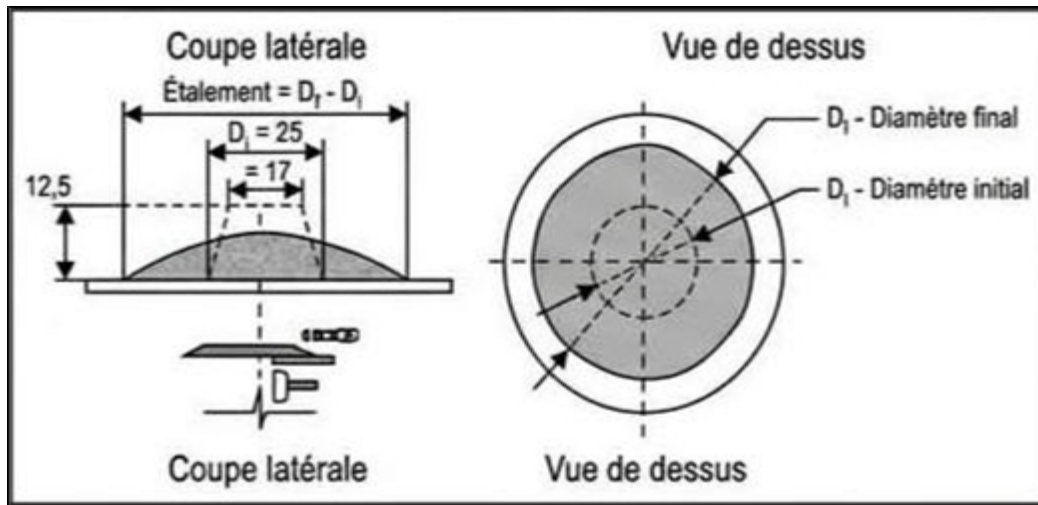


Figure I.7: Consistance du mortier sur la table vibrante

I.12.b. Essai au maniabilimètre (LCPC):

L'essai au maniabilimètre LCPC permet d'évaluer l'ouvrabilité et la fluidité du béton ou du mortier frais en mesurant son temps d'écoulement sous l'effet de vibrations. Le protocole consiste à remplir un compartiment de l'appareil, puis à libérer l'échantillon en soulevant une paroi mobile ; la rapidité avec laquelle le matériau atteint un repère fixe détermine sa consistance. Un temps court témoigne d'une grande fluidité, tandis qu'un temps prolongé traduit une viscosité élevée et une mise en œuvre plus difficile. Cette méthode est particulièrement privilégiée dans la recherche pour analyser l'impact des adjuvants ou de l'incorporation de granulats recyclés sur le comportement rhéologique des mélanges. [9] [10]



Figure I.8: Principe de fonctionnement du maniabilimètre

I.13. Essai de rupture par flexion (ou résistance à la traction par flexion)

Des éprouvettes de mortier sont préparées sous forme de barreaux (dimensions courantes 4x4x16 cm). Les éprouvettes sont laissées à se lier et durcir dans des conditions spécifiques (conservation). Elles sont ensuite testées sur une machine à flexion deux ou trois points : l'éprouvette est placée sur des appuis et une force est appliquée au milieu jusqu'à rupture. On mesure la force maximale (Newton) et on calcule la résistance à la traction par flexion () en MPa (mégapascals).

La relation est.

Cette résistance représente la capacité du mortier à supporter les contraintes dues au vent, aux séismes ou aux mouvements des fondations. [8]

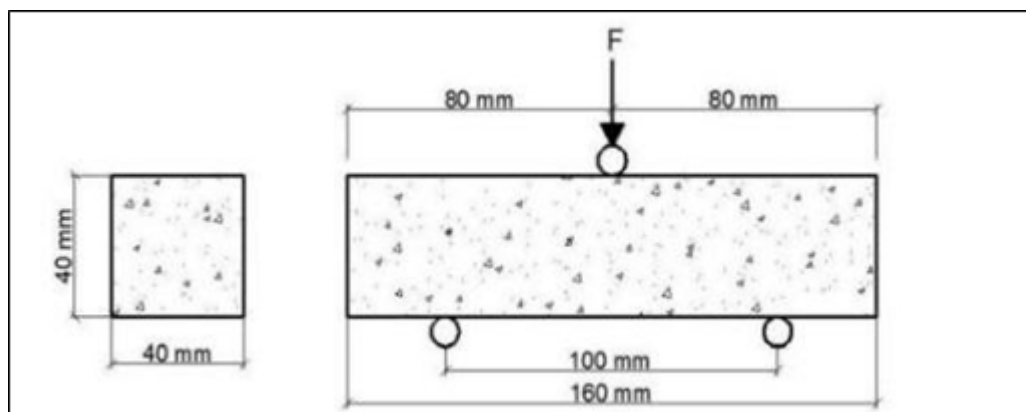


Figure I.9: Schéma d'une machine de concassage à flexion

I.14. Essai de rupture par compression (résistance à la compression)

Elle est réalisée sur la moitié du barreau cassé lors de l'essai de flexion (ou sur des prismes 4x4x16 cm). Une charge verticale progressive est appliquée sur l'éprouvette jusqu'à sa ruine. On calcule la résistance à la compression () en divisant la charge maximale (N) par l'aire de la surface (mm²). [11] [12]

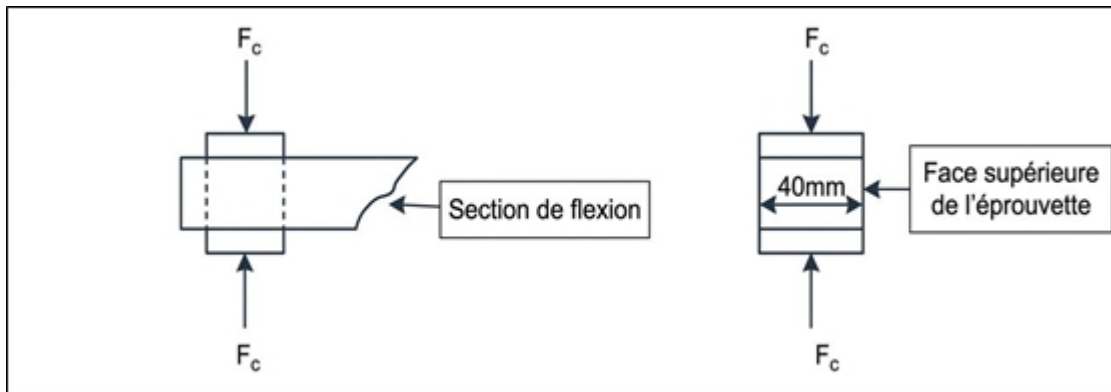


Figure I.10: Il explique le mécanisme de l'écrasement par compression[12]

La valeur de résistance à la compression du mortier varie généralement entre 2,5 MPa et 25 MPa selon le mélange. La résistance à la compression est considérée comme l'indicateur principal de la qualité du mortier et de sa conformité aux spécifications. Les éprouvettes sont généralement testées aux âges de 7, 14, 28 et 90 jours[13].

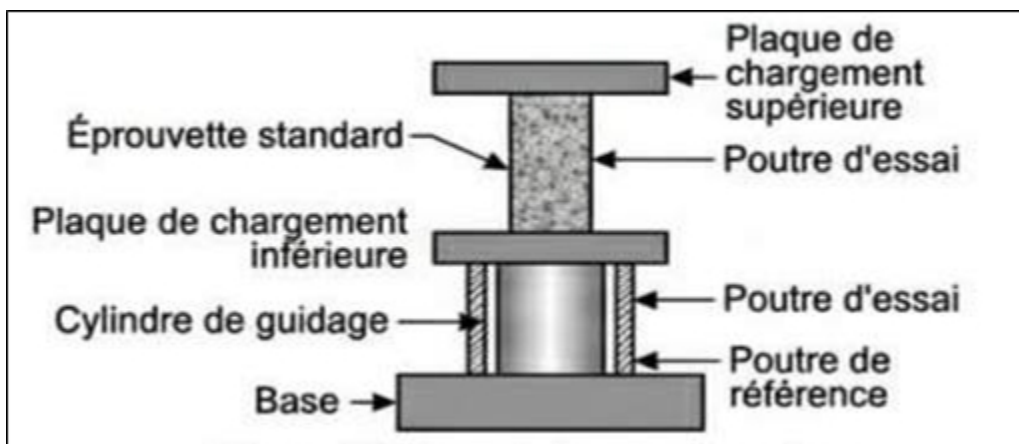


Figure I.11: Dispositif d'essai de compression

I.15. Le retrait

Le retrait est la diminution de volume du mortier après durcissement, due à :

- **Retrait plastique** : Dans les premières heures suite à l'évaporation de l'eau en surface[14].
- **Retrait endogène (auto-retrait)** : Dû à la consommation d'eau à l'intérieur de la pâte par les réactions chimiques (faible rapport eau/liant).
- **Retrait de séchage** : Le plus important, se produit par la perte d'eau évaporée des pores après durcissement, et peut durer des mois.

Le retrait provoque des fissures et le décollement du mortier du support. Moyens de le

limiter :

- Utiliser des rapports eau/liant faibles (avec superplastifiant si nécessaire).
- Cure humide appropriée (arrosage ou couverture plastique.)
- Ajouter des adjuvants réducteurs de retrait.
- Utiliser des adjuvants minéraux fins (comme la poudre de brique et le laitier) qui améliorent le compactage et réduisent les vides. [15] [8]

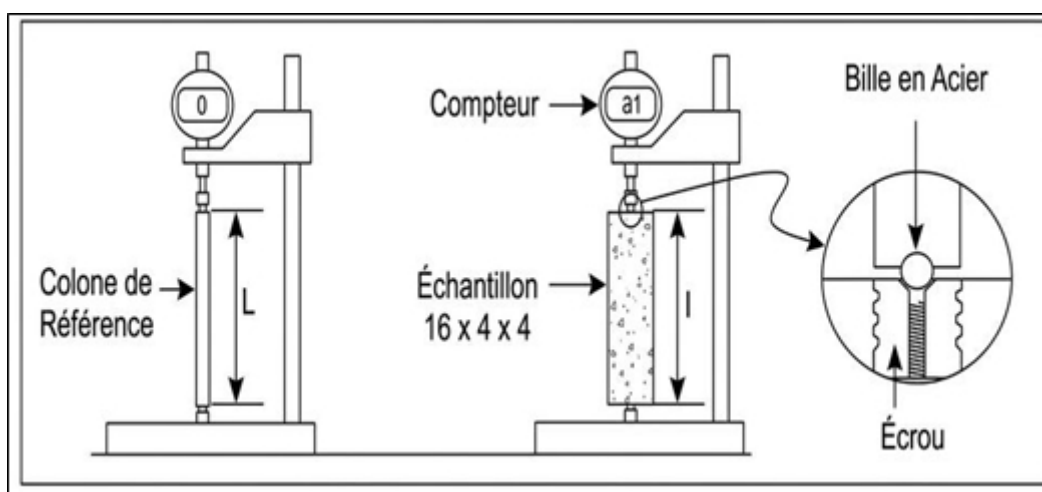


Figure I.12: appareil de mesure du retrait

I.16. le vitesse de propagation des impulsions ultrasonores (UPV)

est l'un des piliers fondamentaux des essais non destructifs (END) pour l'évaluation de la qualité des matériaux de construction. Son principe physique repose sur la mesure du temps mis par les ondes longitudinales pour traverser un matériau sur un trajet de longueur connue, permettant ainsi de calculer la vitesse selon la relation $V = L/T$. L'importance technique de cet essai réside dans sa capacité à détecter les défauts internes, tels que les vides, les nids d'abeilles et les fissures invisibles, tout en évaluant l'homogénéité du béton et son niveau de dégradation temporelle face aux agents environnementaux. Toutefois, la précision des résultats est soumise à diverses influences techniques validées par les normes internationales (telles que l'ASTM C597 ou l'EN 12504-4), notamment le taux d'humidité, la densité des armatures d'acier qui accélèrent le passage des ondes, ainsi que le type de granulats utilisé. C'est pourquoi il est recommandé de coupler ces résultats avec d'autres tests, comme le scléromètre,

pour obtenir une estimation plus précise de la résistance à la compression, sachant que des valeurs dépassant 4,5 km/s sont généralement le signe d'un béton de haute qualité. [16]

I.17. d'absorption capillaire

Le phénomène d'absorption capillaire (ou capillarité) est défini, en mécanique des fluides et en science des matériaux, comme la capacité des liquides à pénétrer et à s'élever à l'intérieur des milieux poreux et des tubes fins. Ce processus résulte de l'interaction entre les forces d'adhésion (entre le liquide et la surface du matériau) et les forces de cohésion (entre les molécules du liquide elles-mêmes), générant ainsi une tension superficielle qui permet au liquide de se déplacer, parfois à l'encontre de la gravité. Dans le secteur du bâtiment, ce phénomène revêt une importance capitale, car le « coefficient de sorptivité » est un indicateur vital pour évaluer la durabilité des matériaux. En effet, plus la capacité d'un matériau (tel que le béton ou le mortier) à absorber l'humidité par capillarité est élevée, plus le risque de transfert de sels et de substances chimiques nocives vers l'intérieur est grand. Cela peut entraîner la corrosion des armatures en acier ou la désintégration de la structure interne sous l'effet de la pression de cristallisation. Ce comportement physique dépend de plusieurs facteurs structurels, notamment la géométrie et la distribution de la taille des pores, ainsi que la nature des composants du matériau, où les ajouts minéraux ou les matériaux recyclés jouent un rôle essentiel dans la modification de la structure poreuse et, par conséquent, dans le contrôle de la perméabilité et de la résistance aux agents atmosphériques. [17]

I.18. Effet du rapport E/C sur la résistance

E/C est le rapport pondéral de l'eau (Eau) au ciment (Ciment) dans le mélange. La relation est fortement inverse : plus le rapport E/C est bas, plus la résistance du mortier est élevée (selon la loi d'Abrams) :

$$\textit{résistance} \approx$$

· E/C = 0,4 → Résistance très élevée (au-dessus de 40 MPa) mais pâte sèche et

difficile à mettre en œuvre.

- $E/C = 0,6 \rightarrow$ Résistance moyenne (15-25 MPa), pâte plastique.
- $E/C = 0,9 \rightarrow$ Résistance faible (moins de 5 MPa), pâte fluide – non souhaitée.

Raison : L'excès d'eau crée des pores remplis d'eau au début, et lorsqu'elle s'évapore, ils se transforment en pores d'air qui affaiblissent la section. Donc, pour une résistance élevée, il faut réduire l'eau tout en ajoutant des superplastifiants ou une poudre très fine (comme la poudre de brique) qui améliore le compactage. [18] [1]

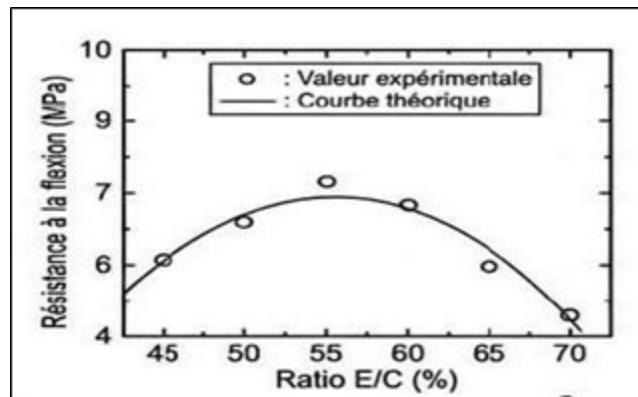


Figure I.13: Effet du rapport E/C sur la résistance à la flexion

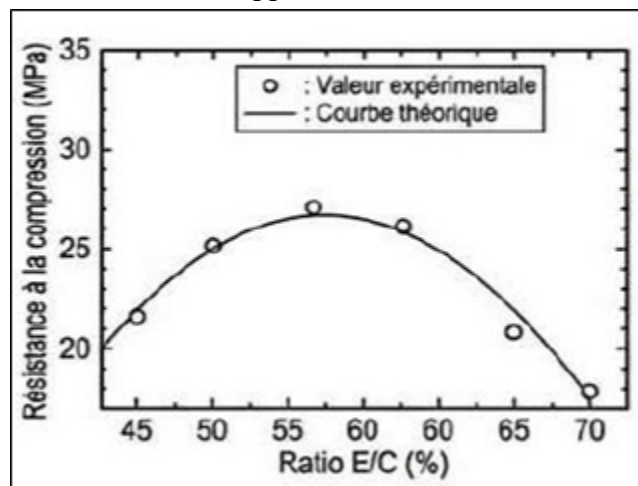


Figure I.14 : Influence du rapport E/C sur la résistance à la compression

I.19. La durabilité (Durabilité)

La « durabilité » est la capacité du mortier à remplir sa fonction pendant la durée de vie du bâtiment sans détérioration inacceptable, face aux facteurs environnementaux, physiques et chimiques. Facteurs menaçant la durabilité[24] :

- **Attaque sulfatique :** Réaction des sulfates (des eaux souterraines ou du sol) avec les

aluminates du ciment (C_3A) et la $Ca(OH)_2$ pour former de l'ettringite et du gypse, composés qui augmentent de volume provoquant fissuration et désagrégation du mortier. Le mortier contenant de la poudre de brique consomme le $Ca(OH)_2$ dans la réaction pouzzolanique, ce qui le protège de cette attaque[19].

- **Réaction alcalis-granulats (RAS)** : Les alcalis du ciment réagissent avec la silice instable du sable, formant un gel expansif qui fissure.
- **Gel-dégel** : L'eau dans les pores gèle et se dilate, provoquant des fissures. L'utilisation d'adjuvants entraîneurs d'air réduit les dommages.
- **Corrosion des armatures métalliques (si le mortier contient du fer)** : Par les chlorures (sel de déneigement ou eau de mer) ou la carbonatation (absorption de CO_2 réduisant l'alcalinité du mortier et rouillant le fer).
- Détérioration chimique par les acides, les huiles ou les sulfates dissous.

Moyens d'améliorer la durabilité : Utiliser du ciment résistant aux sulfates, ajouter des matières pouzzolaniques (brique moulue, cendres volantes), améliorer la cure humide, et bien compacter le mortier pour réduire la porosité. [20]

I.20. Hydratation du ciment

L'hydratation est une réaction chimique exothermique entre les grains de ciment sec et l'eau, produisant de nouveaux composés solides qui lient les granulats. Étapes :

I.20.1.Période avant prise (période dormante) : Dès l'ajout d'eau, des ions se dissolvent de la surface des grains pour former une solution alcaline (pH $\sim 12,5$). Un peu de gypse et de silicates se forment.

I.20..2 Période de prise : Les composés C_3S et C_3A commencent à précipiter, des aiguilles d'ettringite se forment, la viscosité augmente jusqu'à ce que la pâte perde sa plasticité.

I.20..3 Période de durcissement : La réaction continue pendant des jours et des semaines, le gel C-S-H grandit et remplit les vides, et la résistance augmente. Des cristaux de portlandite ($Ca(OH)_2$) apparaissent sous forme de plaquettes hexagonales.

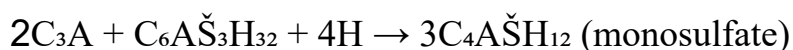
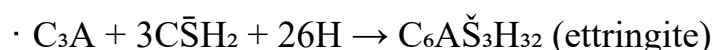
Facteurs influençant l'hydratation : Température ambiante (la chaleur accélère, le

froid ralentit), la finesse (plus le ciment est fin, plus il est rapide), la présence d'adjuvants (accélérateurs ou ralentisseurs), et le rapport E/C.

I.21. Hydratation de l'aluminate tricalcique C_3A

$C_3A = 3CaO \cdot Al_2O_3$ est le composé le plus réactif du ciment avec l'eau. Son hydratation est très rapide et violente, dégageant une haute chaleur. Mais cette réaction rapide provoque une « prise éclair » (flash set) rendant la pâte rigide en quelques minutes. Pour éviter cela, on ajoute du gypse ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) lors du broyage du clinker. Le gypse réagit avec C_3A pour former de l'ettringite ($C_6A\check{S}_3H_{32}$) qui se dépose sur la surface du C_3A et ralentit sa réaction. Après épuisement du gypse, l'ettringite se transforme en monosulfoaluminate ($C_4A\check{S}H_{12}$).

Réactions :



Une forte teneur en C_3A rend le ciment non résistant aux sulfates, car en présence de sulfates externes, le monosulfate se décompose pour former une nouvelle ettringite provoquant gonflement et destruction du béton. Ainsi, le ciment à bas C_3A est utilisé dans les environnements sulfatés.

I.22. Hydratation des silicates de calcium (C_3S et C_2S)

Ce sont les composés responsables de la résistance mécanique du mortier :

- **C_3S (silicate tricalcique – $3CaO \cdot SiO_2$)** : Représente 50-70% du ciment Portland. Réagit relativement rapidement et forme environ 70% du gel C-S-H en 28 jours. Il est le principal responsable de la résistance précoce (les 7 premiers jours). Réaction : $C_3S + H_2O \rightarrow C-S-H + Ca(OH)_2$.

- **C_2S (silicate bicalcique – $2CaO \cdot SiO_2$)** : Réagit très lentement et contribue à la résistance tardive (après 28 jours jusqu'à un an). Produit les mêmes produits que C_3S mais avec moins de chaleur.

Le gel C-S-H (silicate de calcium hydraté) est constitué de particules microscopiques amorphes formant une structure spongieuse adhésive qui enrobe les grains de granulat

et les lie entre eux. Les cristaux de portlandite (Ca(OH)_2) sont secondaires et représentent 20-25% du volume, mais ils sont mécaniquement faibles et réagissent avec les sulfates et les acides.

I. 23. Hydratation du composé C_4AF (aluminoferrite tétracalcique)

$\text{C}_4\text{AF} = 4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ est le composé ferrique du ciment (donnant la couleur grise). Il réagit avec l'eau à une vitesse moyenne, mais son hydratation est similaire à celle du C_3A , bien que moins violente et avec une faible chaleur d'hydratation. En présence de gypse, il produit des composés contenant du fer (ferri-ettringite) similaires à l'ettringite. Ce composé ne contribue pas significativement à la résistance, mais sa présence augmente la résistance du ciment à la corrosion et réduit la chaleur d'hydratation (utile dans les coulées massives). Il confère également au ciment certaines propriétés de finition.

I.24. Action des éléments chimiques nuisibles

Certains sels et produits chimiques réagissent avec les produits d'hydratation du ciment et détruisent le mortier :

- **Sulfates (SO_4^{2-})** : Conduisent au gonflement, à l'expansion et finalement à la fissuration.
- **Chlorures (Cl^-)** : Réagissent avec le C_3A et détruisent la couche protectrice. Dans le mortier ordinaire, les chlorures provoquent une évaporation superficielle et une cristallisation de sels (efflorescence), ce qui affaiblit la surface.
- **Acides (H_2SO_4 , HCl , eaux usées industrielles)** : Réagissent avec le Ca(OH)_2 , neutralisent l'alcalinité, dissolvent le gel C-S-H qui se transforme en sels gypseux non cohésifs.
- **Eaux pures (eau distillée ou eau très douce)** : Dissolvent la chaux libre (Ca(OH)_2) et décomposent la structure du mortier avec le temps (surtout dans les barrages et réservoirs).
- **Huiles et graisses** : Entravent l'adhérence et empêchent l'hydratation correcte.

I.25.Éléments affectant de la durabilité du mortier

Facteurs environnementaux et physiques réduisant la durée de vie du mortier :

1. Teneur en eau élevée (augmentation de la perméabilité) : Cause la plus fréquente de faiblesse et de fissuration.

.2.Granularité du sable inappropriée : Les grands vides augmentent la pénétration de l'eau et des sels.

.3.Variations de température et d'humidité (dilatation et retrait thermiques) : Provoquent des contraintes internes.

.4.Vent et rayonnement solaire direct (lors de la cure) : Séchage rapide empêchant l'hydratation complète.

.5.Mouvements de fondations ou séismes : Si le mortier est trop rigide et manque de flexibilité, il fissure.

.7.Qualité des liants : Ciment médiocre ou chaux mal éteinte (contenant des grains vifs provoquant des gonflements).

.8.Présence d'impuretés organiques dans le sable (humus, charbon) : Affecte l'hydratation et affaiblit l'adhérence.

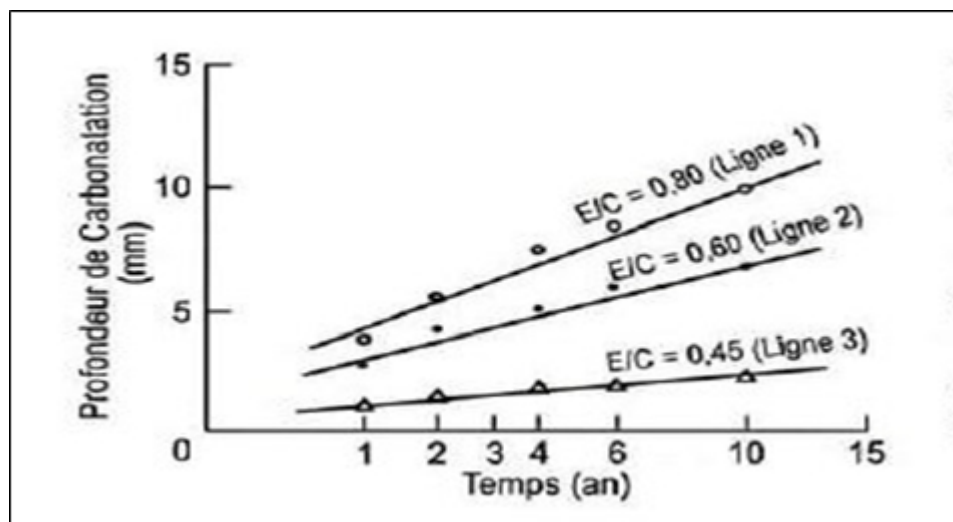


Figure I.15 : Effet du rapport eau/ciment (E/C) sur la profondeur de la couche de carbonatation au fil du temps

I.26. Facteurs influençant le processus de corrosion du mortier

Généralement, le mortier ne contient pas d'armatures sauf dans les éléments minces (comme le treillis métallique dans l'enduit). La corrosion du fer se produit lorsque la couche passive (couche d'oxyde protectrice) est détruite par :

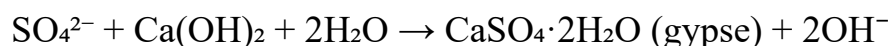
- **Baisse de l'alcalinité (pH inférieur à 10) :** Se produit par carbonatation (absorption du CO_2 de l'air qui réagit avec le Ca(OH)_2 pour former CaCO_3 et fait chuter le pH de 12,5 à 8-9). Le fer perd alors sa protection et rouille.
- **Présence de chlorures (Cl^-) :** Pénètrent la couche passive même à haute alcalinité, provoquant une corrosion par piquûres (pitting corrosion).
- **Humidité et oxygène :** Nécessaires à la réaction chimique de corrosion. La rouille du fer a un volume plus grand que le fer d'origine, générant des pressions internes dans le mortier qui conduisent à la fissuration et à l'écaillage de la surface (rouille de l'enduit).

I.27. Mécanisme d'action des sulfates SO_4^{2-} – Détail important

Ce mécanisme est l'une des menaces les plus graves pour la durabilité du mortier, en particulier dans les sols gypseux et les eaux polluées par le drainage ou l'agriculture.

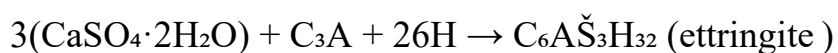
Le mécanisme de destruction implique deux réactions principales :

1. Réaction des sulfates avec le Ca(OH)_2 (chaux libre) pour former du gypse :



Le gypse formé a un volume plus important que la chaux libre, ce qui provoque des pressions internes et un gonflement.

2. Réaction du gypse formé avec le composé C_3A (aluminat tricalcique) ou avec le monosulfoaluminat pour former de l'ettringite secondaire :



L'ettringite est constituée de longs cristaux aciculaires dont le volume est 2 à 3 fois supérieur au volume initial des composés réagissants. Cette expansion massive provoque des fissures importantes, la désagrégation du mortier et le décollement des couches (l'enduit tombe, les joints se fissurent).

Moyens de prévention :

- Utiliser un ciment résistant aux sulfates (faible teneur en C_3A , moins de 5%).
- Ajouter des matières pouzzolaniques (poudre de brique et résidus de béton à 10-30%, etc.) qui consomment le $Ca(OH)_2$ avant qu'il ne réagisse avec les sulfates. C'est la raison scientifique pour laquelle la poudre de brique protège le mortier de l'attaque sulfatique : elle réduit la quantité de chaux libre disponible pour la première réaction.
- Réduire le rapport E/C et diminuer la perméabilité afin que les sulfates ne puissent pas pénétrer à l'intérieur du mortier.

I.28.Conclusion

Le mortier n'est pas seulement une pâte de sable et de ciment, c'est un matériau composite complexe nécessitant une compréhension précise des composants, des proportions, des réactions chimiques et des facteurs environnementaux. Les points les plus importants à retenir :

- **La qualité des matériaux et du mélange est une condition essentielle pour la durabilité :**

faible rapport E/C, sable propre et à granulométrie étalée, liant approprié.

- Les adjuvants minéraux comme la poudre de béton recyclé et la poudre de brique broyée offrent des moyens économiques et écologiques d'améliorer les propriétés du mortier, à condition de les utiliser dans des proportions optimales. La poudre de brique, en particulier, est très efficace contre les sulfates et confère au mortier une durabilité historique semblable aux mortiers romains.
- La durabilité nécessite de protéger le mortier des sulfates, des acides, du gel et du retrait.
- L'hydratation du ciment est un processus équilibré entre les composés C_3S (résistance précoce) et C_2S (résistance tardive), tandis que le C_3A est un danger qui nécessite du gypse et un contrôle, et la poudre de brique consomme la chaux libre, améliorant ainsi toutes les propriétés.
- L'ouvrabilité et la résistance sont régies par des normes telles que la **NFP18-452** et

les essais de flexion/compression, et suivent le rapport E/C.

I.29. Conclusion finale :

L'application des connaissances scientifiques dans la composition et la mise en œuvre du mortier garantit des bâtiments plus sûrs et plus durables, et réduit les travaux d'entretien et de réparation à long terme. L'utilisation de déchets recyclés (béton ancien, briques cassées) transforme les polluants environnementaux en matières à haute valeur technique.

Chapitre II: Méthode de formulation et essais expérimentaux

II.1.Introduction:

L'étude et les essais des matériaux constituant le mortier représentent une étape essentielle pour comprendre leurs propriétés et leur influence sur ses performances. Dans le deuxième chapitre, nous avons abordé les principaux essais permettant d'évaluer la qualité de ces matériaux et leur aptitude à l'utilisation. Cela permet de déterminer la formulation optimale garantissant une bonne ouvrabilité et une résistance mécanique élevée

II.2.Préparation du mortier:

La quantité de mortier est déterminée. Nous avons utilisé une formulation de mortier dite standard, composée de :

une part de ciment (C), trois parts de sable (S) et un rapport eau/ciment (E/C) ajusté selon la maniabilité souhaitée.

Dans notre étude, nous avons remplacé (10 %, 20 %, 30 %) de la masse du ciment par des déchets de béton et de brique traités et non traités thermiquement à 500 °C, intégrés dans le mortier. Les éprouvettes réalisées, de dimensions (4×4×16) cm, sont au nombre de 195 et ont été conservées dans des conditions normales. [21] [6]

II.2.1.Formulation du mortier :

- Préparation des matériaux utilisés.
- Mélange des matériaux secs d'abord, puis ajout de l'eau et malaxage pendant quelques minutes jusqu'à obtention d'un mortier homogène.
- Réalisation de l'essai d'ouvrabilité.

- Mise en place (coulage) dans les moules[22].

Tableau II.1 : Composants du mortier

Les composants	poudre de résidus de béton ou de brique(kg)	ciment (kg)	sable (kg)	Eau (kg)
Mortier témoin	/	0,4042	1.212	0.202
10%	0,0402	0.3637	1.212	0.202
20%	0,0808	0.3233	1.212	0.202
30%	0,1212	0.2829	1.212	0.202

Tableau II.2 : Composants du mortier 1m³

Eau (kg)	sable (kg)	ciment (kg)	poudre de résidus de béton ou de brique(kg)	Les composants
200	1200	400	/	Mortier témoin
200	1200	360	40	%10
200	1200	320	80	%20
200	1200	280	120	%30



Figure II.1 : Quantités de matériaux utilisés dans le mélange

II.2. 2. Ouvrabilité NF P 18-452

L'ouvrabilité est l'une des propriétés physiques caractéristiques du mortier. Elle représente un moyen d'évaluer sa facilité de mise en œuvre. Un mortier ordinaire nécessite une quantité normale d'eau, ce qui se traduit par le rapport E/C (eau/ciment). Dans des conditions normales, ce rapport est d'environ 0,5. Cette propriété est liée à la finesse élevée du mélange.

Essai d'ouvrabilité

On place le mortier sur une table à chocs (table d'étalement), puis on observe la valeur de l'étalement. À partir de cette valeur, on détermine le type de mortier, qui est classé selon son ouvrabilité en trois catégories[23]

Mortier ferme

Mortier plastique

Mortier très plastique

II.2. 2. 1.Principe de l'essai

Le moule tronconique en acier, de dimensions suivantes :

diamètre inférieur = 25 cm, diamètre supérieur = 17 cm et hauteur = 12,5 cm, est rempli de mortier en deux couches égales. Chaque couche est compactée 10 fois à l'aide d'une tige en acier. Ensuite, le moule est soulevé verticalement, puis on applique une série de 15 chocs (hauteur de chute : 12,5 mm) en 15 secondes. Après étalement, on mesure le diamètre final D du mortier.

II.2. 2. 2. Description de l'appareil

L'appareil utilisé pour mesurer l'ouvrabilité est appelé table à chocs (table d'étalement). Il s'agit d'un essai expérimental permettant de vérifier la consistance du mortier en déterminant sa valeur d'étalement après malaxage.



Figure II.2: Explication du tableur et des mesures opérationnelles[8]

Tableau II.3 : Tableau de qualité du mortier

Qualité du mortier	Valeur en mm
Boue solide	<140
Mortier souple	$140 \leq V < 200$
Mortier très flexible	$200 <$

Dans notre étude, nous avons constaté que la valeur opérationnelle était de 14 mm au témoin, de 14,3 mm à 10 %, de 14,7 mm à 20 % et de 14,9 mm à 30 %, si la qualité du mortier était un mortier flexible dans la plage de 140 à 200.

II.2. 3. Moulage (Préparation des éprouvettes):

Dans notre étude, nous avons préparé 195 éprouvettes de dimensions (4×4×16) cm, en remplaçant différentes proportions de ciment (10 %, 20 %, 30 %) et en les conservant à l'air libre[22].

III.2. 4. Étapes de préparation du moulage :

Préparation et graissage des moules.

Préparation du mélange selon les quantités calculées.

Mise en place du mortier dans les moules, suivie d'un compactage (vibration) afin d'assurer l'homogénéité du mélange.

Élimination de l'excès de mortier et nivellement de la surface des éprouvettes.



Figure II.3: Expliquez le processus de mélange



Figure II.4: Le processus de moulage est expliqué

Les éprouvettes sont laissées à l'air libre, puis démoulées après 24 heures

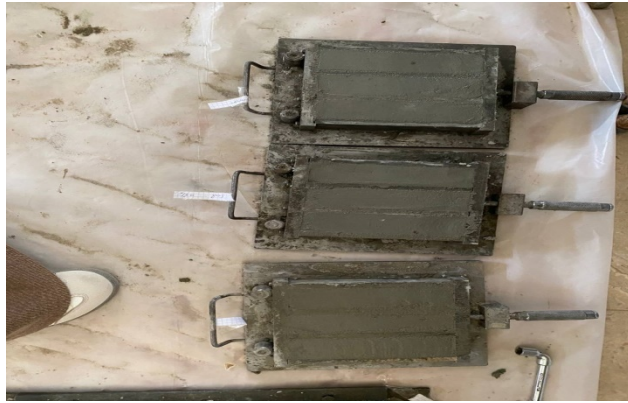


Figure II.5: Des échantillons pleines

Ensuite, elles sont conservées pendant des périodes déterminées en fonction des essais à réaliser.



Figure II.6: Échantillons dans l'air

II. 3. Méthodes d'essais sur les éprouvettes :

Il existe deux types d'essais réalisés sur le mortier : des essais destructifs et des essais non destructifs. Les essais destructifs entraînent la rupture de l'échantillon ; il est donc impossible d'obtenir les résultats sans détruire complètement le corps d'épreuve. Ces essais sont généralement effectués sur des éprouvettes normalisées

préparées à l'avance. En revanche, les essais non destructifs n'endommagent pas l'échantillon et ne laissent aucune trace visible

II. 3. A. des essais non destructifs

II.3. A.1. Essai d'absorption d'eau par capillarité

L'absorption d'eau par capillarité constitue l'une des propriétés physiques les plus importantes permettant d'évaluer le comportement du béton ou du mortier vis-à-vis de la pénétration de l'eau à l'intérieur des pores fins. Ce phénomène se produit en raison de l'existence d'un réseau de vides capillaires dans le matériau, où l'eau monte progressivement sous l'effet des forces de tension superficielle sans application d'une pression extérieure.

Le phénomène d'absorption capillaire dépend principalement de deux paramètres essentiels : la porosité effective du béton et la vitesse de déplacement de l'eau à travers les pores. Plus la porosité est importante et les pores sont interconnectés, plus le matériau devient capable d'absorber l'eau. Ainsi, cet essai représente un indicateur important de la qualité du béton, de sa durabilité et de sa résistance aux agents extérieurs tels que l'humidité et les sels. L'essai est réalisé sur des éprouvettes préalablement séchées. Une seule face de l'échantillon est mise en contact direct avec l'eau, puis l'augmentation de la masse est mesurée au cours du temps en raison de l'absorption de l'eau. Les mesures sont effectuées à différents intervalles de temps : 15 min, 30 min, 1 h, 2 h, 4 h, 6 h, 8 h et 24 h.

Le coefficient d'absorption capillaire est déterminé par la relation suivante :

Où :

C_{at} : coefficient d'absorption capillaire à l'instant t exprimé en kg/m^2 .

M_t : masse de l'éprouvette à l'instant t (kg)

M_0 : masse initiale sèche de l'éprouvette (kg)

A : surface en contact avec l'eau ((



Figure II.7: Échantillons dans l'eau

II. 3. A.2. Les ultrasons dans le béton

L'essai ultrasonique est un essai non destructif utilisé pour évaluer la qualité et l'homogénéité du béton en mesurant la vitesse de propagation des ondes ultrasoniques à travers celui-ci. Cette vitesse dépend de la compacité, de la densité et de la présence éventuelle de fissures ou de vides dans le béton.

La vitesse des ondes est donnée par la relation :

$$V =$$

Où :

V : vitesse des ultrasons (m/s)

L : distance entre les sondes (m)

T : temps de propagation (s)

Le module d'élasticité dynamique du béton peut également être déterminé par la relation suivante :

$$E =$$

Où :

E : module d'élasticité dynamique du béton.

ρ : masse volumique du béton (kg/m³)

ν : coefficient de Poisson.

V : vitesse de propagation des ondes ultrasoniques (m/s)



Figure II.8: Dispositif de vitesse d'impulsion ultrasonique

II. 3. A.3. Essai de retrait (retrait linéaire):

L'essai de retrait est réalisé sur des éprouvettes de dimensions (4×4×16) cm. Celles-ci sont munies, sur leurs faces supérieure et inférieure, de deux inserts (écrous) sur lesquels sont fixées deux billes métalliques.

L'éprouvette est ensuite placée dans un appareil numérique permettant de mesurer directement la variation de longueur, à partir d'une longueur initiale préalablement réglée. L'appareil utilisé est de type Retrocontrole[24].

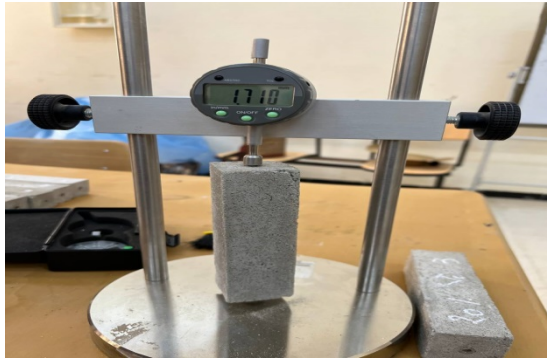


Figure II.9:Le processus de mesure du retrait est expliqué

Cet essai est conforme à la norme **NFP 15-433**.

II.3. B. Les essais destructifs

II. 3. B.1.Essai de flexion :

L'essai de flexion est réalisé sur des éprouvettes de dimensions (4×4×16) cm.

La distance entre les deux appuis est de 10 cm. Cet essai est effectué à l'aide d'une machine de flexion à trois points. La machine est équipée de deux appuis cylindriques inférieurs fixes sur lesquels repose l'éprouvette, ainsi qu'un appui supérieur cylindrique appliqué au milieu de l'échantillon par le moteur de la machine afin d'exercer la charge. La force appliquée est lue directement sur la machine.

Cet essai est défini conformément à la norme EN 196-1[25].



Figure II.10: Expliquez le processus de Flexion

L'essai est réalisé à l'aide d'une machine de rupture par flexion sur une éprouvette de mortier de dimensions (4×4×16) cm, où la résistance à la flexion est calculée selon la relation suivante :

$=R_f$

Ou:

R_f :Résistance à la flexion(Mpa).

F_r :Force d'écrasement de l'échantillon lorsqu'il est plié(KN)

I :Après les deux chaînes de transmission) mm(

b:Après avoir sectionné l'échantillon40mm

L :Longueur totale de l'échantillon

II.3. B.2.Expérience d'écrasement par pression :

Cette expérience, prescrite selon la norme EN 1961, est réalisée à l'aide d'un appareil de compression de solides sur la moitié de l'échantillon. Cette moitié, prélevée lors de l'essai de flexion, présente une section transversale de dimensions (40 × 40 × 160) mm. L'échantillon est placé entre deux plaques métalliques rigides, ces dernières étant positionnées à 1 cm des bordsLatéral.

Ou:

R_c: Résistance à la compression en (MPa)

: La force de rupture de l'échantillon à la pression (N)

b: La portion de l'échantillon qui équivaut à 40 (mm)



Figure II.11: illustre le processus de broyage par pression.

II.4. Conclusion:

Dans ce chapitre, nous avons étudié le mortier à l'état frais en réalisant l'essai d'ouvrabilité sur des mortiers où le ciment a été partiellement remplacé par des taux de 10 %, 20 % et 30 % par des déchets de brique et de béton recyclé. Les résultats ont montré que le mortier présente une bonne ouvrabilité (mortier plastique).

Concernant l'état durci, nous avons réalisé les essais suivants :

Essai de retrait mesuré aux âges de 1, 2, 3, 4, 7, 14 et 28 jours sur 39 éprouvettes.

Essai de résistance à la compression sur 156 éprouvettes aux âges de 7, 14, 28 et 60 jours, conservées en milieu aérien.

Essai de résistance à la flexion sur 156 éprouvettes aux âges de 7, 14, 28 et 60 jours, conservées en milieu aérien.

Les résultats obtenus, qui seront analysés dans le chapitre suivant, ont montré une certaine variabilité, influençant la durabilité et les performances mécaniques du mortier, ce qui nécessite la proposition de solutions appropriées.

Chapitre III Propriétés des matériaux utilisés

III.1. Introduction

Les propriétés des matériaux constituent l'un des facteurs essentiels qui contrôlent le comportement et les performances des matériaux de construction, notamment le mortier utilisé dans différentes applications de génie civil. En effet, les propriétés physiques, mécaniques et chimiques des matériaux entrant dans sa composition influencent directement la résistance, la durabilité et l'ouvrabilité du mortier au cours du temps. avec l'augmentation continue des déchets issus du secteur de la construction et de la démolition, il est devenu nécessaire de rechercher des solutions durables permettant le recyclage et la valorisation de ces déchets dans la fabrication de nouveaux matériaux de construction présentant des performances acceptables. Parmi ces déchets figurent les Déchet de brique et les déchets de béton, qui peuvent être utilisés comme substituts partiels du ciment ou des granulats dans le mortier. les déchets de brique se distinguent par leur capacité à améliorer certaines propriétés physiques grâce à leur nature poreuse et leur finesse, tandis que les déchets de béton

contribuent à renforcer les résistances mécaniques et à valoriser les déchets de démolition. Ainsi, l'étude des propriétés de ces matériaux constitue une étape indispensable pour comprendre leur influence sur le comportement du mortier aussi bien à l'état frais qu'à l'état durci.

Dans ce contexte, ce chapitre vise à présenter les principales propriétés des matériaux utilisés dans cette étude, en mettant en évidence leurs caractéristiques physiques, chimiques et mécaniques ainsi que leur influence sur la durabilité et la résistance du mortier fabriqué à partir de déchets de brique et de déchets de béton. [26]

III.2. Le sable:

- Le sable dunaire (Sable de dunes) : c'est le type dominant dans la région, caractérisé par sa finesse, issu de l'érosion éolienne.
- Le sable alluvionnaire (de oued) : présent dans certains lits d'oueds et zones avoisinantes, généralement plus grossier que le sable dunaire, il est préféré pour certains travaux de béton. [27]

III.2.1. La masse volumique :

Elle a pour objectif d'identifier le type de sable utilisé ainsi que sa densité, et de déterminer les volumes et les masses entrant dans la composition du mortier. Elle constitue une base essentielle pour le dimensionnement et le dosage des mélanges. [28]

III.2.1. 1.Masse volumique apparente

L'objectif est de déterminer la masse d'une unité de volume du sable à l'état naturel (y compris les vides entre les grains)(Elle est définie comme le rapport entre le poids total de l'échantillon et le volume total, selon la relation suivante[29] :

Où :

: masse volumique apparente

: masse totale de l'échantillon (kg(

: volume total de l'échantillon (m^3)

Données:

= 300 kg

= 220



Figure III.1: L'image montre la masse volumétrique apparente

III.2.1. 2.Masse volumique Absolue

Elle vise à déterminer la masse d'une unité de volume de la matière solide constituant le sable uniquement, en excluant les vides entre les grains. Elle est définie comme le rapport entre la masse des grains solides et leur volume, selon la relation suivante[30]

:

Où :

: masse volumique absolue (kg/m^3)

: masse des grains solides (kg)

: volume des grains solides (m^3)

Données :

= 500 xkg

=380x



Figure III.2 : L'image montre la masse volumétrique absolue

Tableau III.1: Il présente les résultats de la masse volumétrique

La masse volumique apparente (kg/m³)	1.31
La masse volumique absolue (kg/m³)	1.36

III.2.2. Essai de l'Équivalent de Sable (ES)

Cet essai sert à mesurer le degré de propreté du sable et à déterminer la proportion d'impuretés argileuses ou de fines qui pourraient affaiblir l'adhérence du mortier[31].

III.2.2. a. Principe de l'essai

L'essai repose sur le lavage d'un échantillon de sable pour déterminer le taux d'impuretés et son aptitude à l'utilisation dans la construction, [32].

III.2.2. b. Étapes de l'expérience

- 1 Tamisage de 120 g de sable avec un tamis de 5 mm pour éliminer les gravillons.
- 2 Immersion des 120 g de sable dans une solution flocculante.

- 3 Agitation à l'aide d'un appareil automatique pendant 40 secondes.
- 4 Repos de l'échantillon pendant 20 minutes pour permettre la sédimentation.
- 5 Mesure des hauteurs des dépôts :
 - La couche inférieure représente le sable propre (hauteur (
 - La couche supérieure représente le sable avec les impuretés (hauteur (

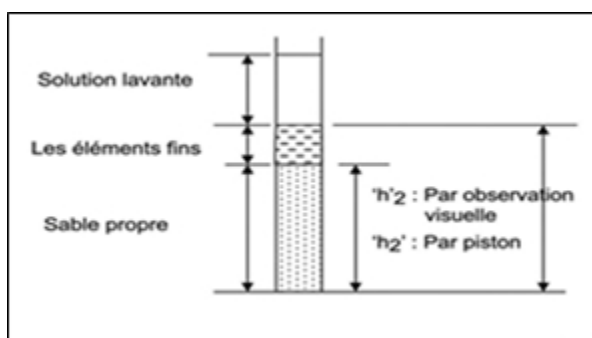


Figure II.3 : Tube gradué spécial pour essai d'équivalence de sable

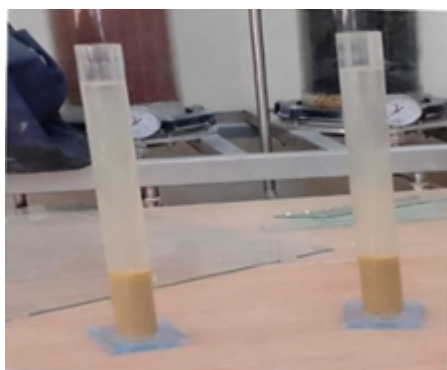


Figure III.4 : L'expérience avec l'équivalent de sable et la machine vibrante illustre

III.2.2. c. Résultats obtenus

- À vue d'œil (ESV) : 66%
- Au piston (ES) : 65%

III.2.3. Analyse Granulométrique

C'est l'un des essais physiques les plus importants pour le sable. Il permet de connaître la distribution dimensionnelle des grains, ce qui détermine la qualité du mélange de béton et sa maniabilité. L'essai consiste à séparer les grains de sable selon leur taille à

l'aide d'une série de tamis (Sieves) aux ouvertures décroissantes[33]. [34]

III.2.3. 1.Outils utilisés

- Série de tamis normalisés (de 5 mm à 0,08 mm (
- Balance de précision.
- Étuve de séchage.

III.2.3. 2.Étapes de l'expérience

1. Préparation : Séchage d'un échantillon (ex: 500g ou 1000g) à 105°C.
2. Disposition : Empilement des tamis par ordre décroissant avec un fond de tamis (Pan(
3. Tamisage : Vibration manuelle ou mécanique pendant 2 à 4 minutes.
4. Pesage : Mesure du refus partiel sur chaque tamis.



Figure III.5 : Expérience de gradient granulaire



Figure III.6 : Explication du sable coincé dans les tamis

Tableau III 2: Tableau des résultats de l'analyse granulométrique du sable de Jamra

ouvertures de tamis(mm)	Masse retenue (g)	Masse cumulée (g)	Pourcentage cumulé (%)	Pourcentage passant(%)
5	8	8	0.4	99.6
2.5	40	48	2.4	97.6
1.25	90	151	7.6	92.4
0.63	17.63	533	27.65	72.35
0.315	960	1513	75.65	24.35
0.16	373	1886	94.3	5.7
0.08	99	1985	99.25	0.75

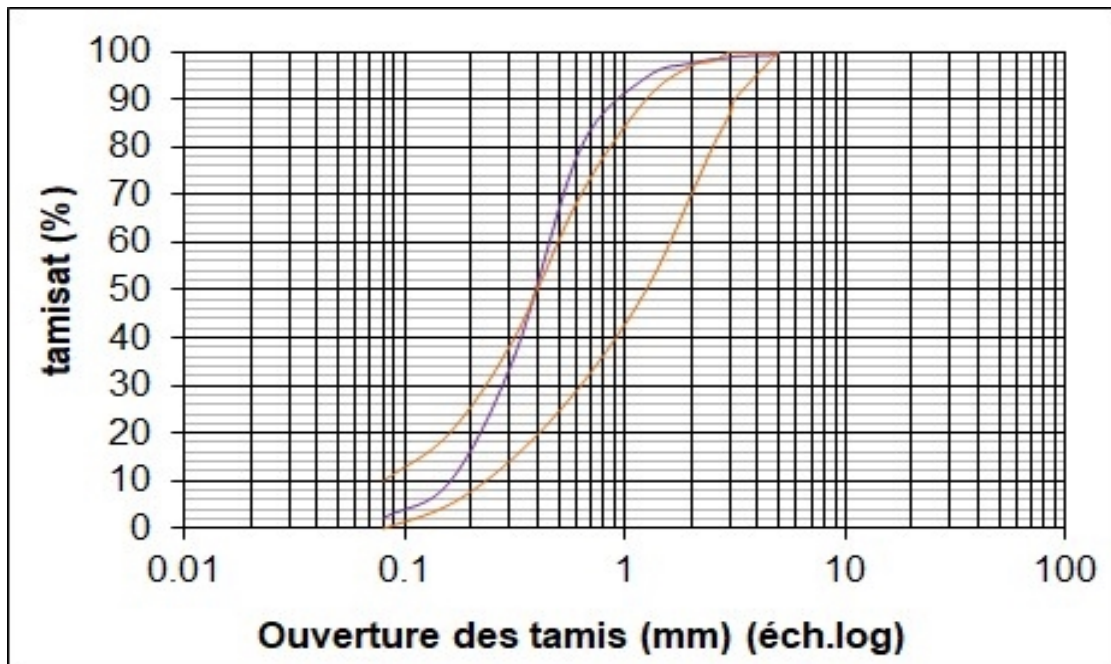


Figure III.7: courbe granulométrie du sable utilisé

III.2.4. Module de Finesse (

C'est un indicateur numérique de la granulométrie :

2,2,8 2 : Sable excellent pour le mortier et le béton.

•2,2 < : Sable trop fin (augmente le besoin en eau et ciment (.

•2,8 > : Sable grossier (manque de maniabilité et présence de vides([.35]

Résultat :

= 2,08 Le sable est situé dans la zone B, ce qui signifie qu'il a une granulométrie acceptable et préférentielle pour le béton et le mortier.

Tableau III 3: Il présente les résultats de la Module de finesse

tamis(mm)	5	2.5	1,25	0.63	0.315	0.16	Totale	
Pourcentage de résidus dans le tamis(%)	0,4	2.4	7.6	27,65	75.65	94.3	208	2.08

III.3. L'Eau

L'eau est un élément vital du mortier, souvent sous-estimé. Elle est le moteur de

l'hydratation et de la maniabilité.

- **Propriétés** : Doit être pure, sans huiles, sels ou matières organiques. En règle générale, toute eau potable est propre à la confection du mortier.
- **Rapport Eau/Ciment (E/C)** : C'est le rapport entre le poids de l'eau libre et le poids du ciment. Un mauvais dosage affecte la résistance (porosité, fissuration).
- **Étude** : Réalisée avec de l'eau du robinet avec des rapports E/C de 0,45, 0,50, et 0,55.

III.4. Le Ciment

Le ciment est un liant hydraulique qui durcit par réaction chimique avec l'eau (hydratation)

- **Type utilisé** CEM II 42.5 (N/R)
- **Caractéristiques** : Haute résistance mécanique, bonne maniabilité et chaleur d'hydratation modérée[36].



Figure III.8: Ciment

III.5. Les déchets de brique

Ces déchets proviennent de l'atelier de construction. Ils ont été concassés manuellement, puis broyés jusqu'à la fraction granulaire inférieure à 80µm. [4]



Figure III.9: déchets de brique

Dans cette étude, nous avons réalisé une analyse par diffraction des rayons X sur les additifs de BAP sous forme de poudre afin de déterminer leur structure cristalline. La figure suivante illustre le diagramme résultant de l'analyse DRX de l'échantillon de poudre de brique

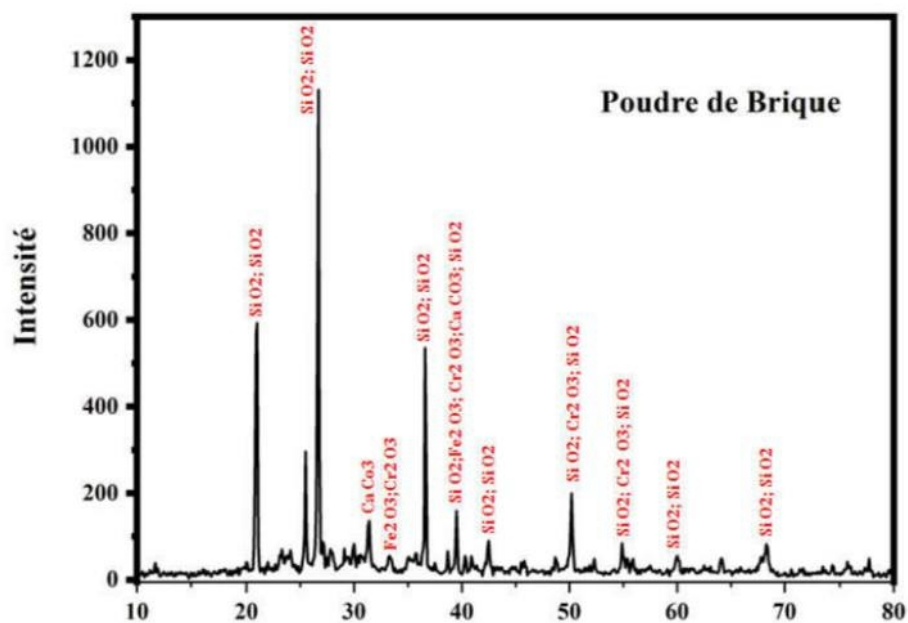


Figure III.10: Diagramme d'analyse (DRX) sur Poudre de Brique

Après comparaison et analyse du diagramme ci-dessus, nous avons obtenu les résultats indiqués dans le tableau ci-dessous

Tableau III.4: Composition chimique du déchet de brique broyé

Nom du compose	Formuel chimique	Scor%
Oxyde de silicium	Sio2	61
Phosphore de potassium	K3PO4	36
Sulfate de calcium et de dysprosium	CaDy02SO4	26

Dans cette étude, nous avons calculé la masse volumétrique du Brique

Tableau III.5: Quelques caractéristiques de déchet de brique broyé

Caractéristique	Forme	Coulee	Densité absolue g/cm3	Densit Apparent g/cm3	La dosage recommandé %
Résultats	Poudre	Maaron	1.200	1.250	10%_30%

III.6. Les déchets de béton

Ces déchets proviennent de l'atelier de Ces déchets proviennent de l'atelier de construction. Ils ont été concassés manuellement, puis concassés manuellement, puis broyés jusqu'à la fraction granulaire inférieure à 80µm. [4]



Figure III.11: déchets de béton

La figure suivante illustre le diagramme résultant de l'analyse **DRX** de l'échantillon de déchets de béton broyés en poudre

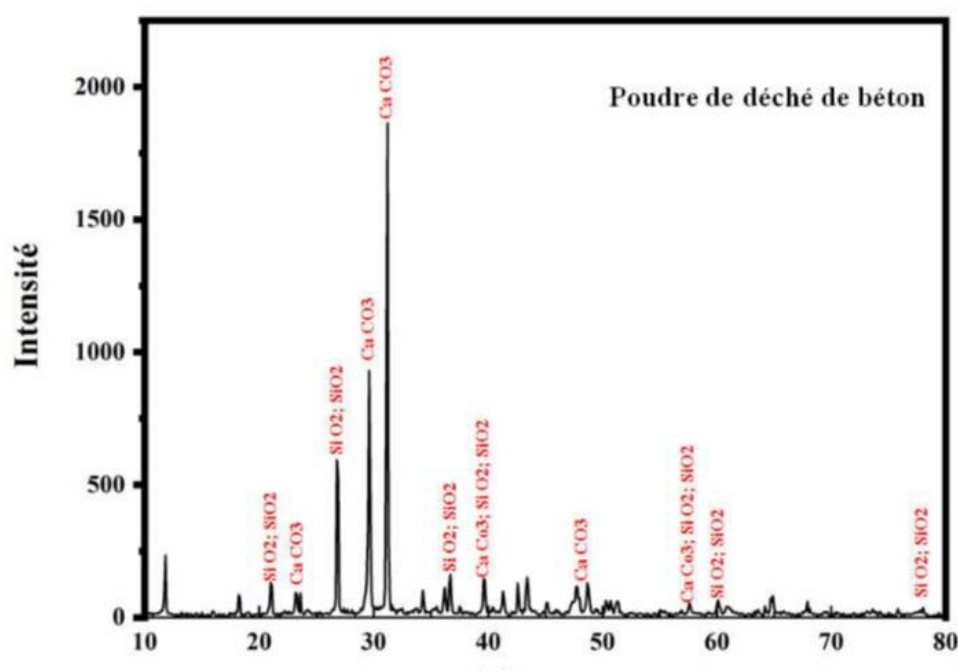


Figure III.12: Diagramme d'analyse de (DRX) sur Poudre de Déché de Béton

Après comparaison et analyse du diagramme ci-dessus, nous avons obtenu les résultats indiqués dans le tableau ci-dessous.

Tableau III.6: Composition chimique du déchet de béton broyé.

Nom du composé	Formuel chimique	Score
Carbonate de calcium	Ca (CO ₃)	45
Oxyde de calcium	SiO ₂	41
Carbonate de calcium et de mangnésium	CaMg(CO ₃) ₂	34

Dans cette étude, nous avons calculé la masse volumétrique du béton

Tableau III.7: Quelques caractéristiques de déchet de béton broyé

Caractéristique	Forme	Couleur	Densité absoulue g/cm ³	Densité apparent g/cm ³	dosage recommandé Caractéristique %
Réusltats	poudre	Gris	1.422	1.330	10%_30%

III.6.1. La masse volumique de déchrts:

Tableau III.8: Composition chimique du déchet de béton broyé

Le déchets	La masse volumique apparente (kg/m ³)	La masse volumique absolue (kg/m ³)
déchets de brique	1.2	125.
déchets de béton	1.333	1.422

III.7. Conclusion

D'après les résultats obtenus sur le sable de la région de Djamaa (Wilaya d'El M'Ghair)

- 1. Granulométrie :** Le sable présente une graduation acceptable pour le béton.
- 2. Pureté :** Le sable est de haute qualité et exempt d'impuretés nocives.
- .3 Mortier Témoin :** Composition 1/3 (un volume de ciment pour trois de sable) avec des rapports E/C variant entre 0,45 et 0,55.

Chapitre IV : Interprétations, Résultats et Courbes

IV.1. Introduction

Ce chapitre est dédié à la présentation des résultats sous forme de graphiques, où l'ensemble des caractéristiques du mortier étudié sera analysé et interprété, aussi bien à l'état frais qu'à l'état durci.

Les propriétés étudiées :

- Propriétés physiques : (Ouvrabilité, perte de masse, retrait).
- Propriétés mécaniques : (Résistance à la traction par flexion, résistance à la compression).

IV.2.Comportement du mortier à l'état frais :

Nous présentons tout d'abord les résultats obtenus immédiatement après le malaxage afin de caractériser ce type de mortier. Ces résultats permettent d'étudier les propriétés du ciment à l'état frais et d'observer l'influence du rapport eau/ciment (E/C) [37].

IV.2.1. Maniabilité (Workability) :

La maniabilité est une propriété essentielle pour définir le comportement du mortier à l'état frais. Dans cette étude, le rapport eau/ciment a été maintenu constant à $E/C =$

0,50 pour l'ensemble des mélanges préparés. Cette démarche vise à comprendre l'influence de la substitution des matériaux conventionnels par des matériaux durables sur les comportements physique et mécanique. À cet effet, nous avons préparé des variantes de mortier intégrant différents taux de substitution de Déchet de béton et de poudre de brique (traitée thermiquement et non traitée) aux dosages de 10%, 20% et 30%. En utilisant la table à secousses pour déterminer le diamètre d'étalement, un niveau de maniabilité de référence de 14,2 cm a été ciblé ; toutefois, il a été observé ce qui suit :

- **Variation légère de la maniabilité** : Une différence relative dans les résultats du diamètre d'étalement entre les différents mélanges, malgré la fixité de la quantité d'eau ajoutée.
- **Influence des propriétés physiques** : Ce changement est directement attribué à la nature différente des matériaux ajoutés, notamment la capacité d'absorption d'eau des Déchet de brique et de béton, ainsi que la variation de la finesse de la poudre.
- **Effet des taux de substitution** : La variation des taux de poudre de récupération (10%, 20%, 30%) a influencé de manière relative la fluidité du mélange.
- **Homogénéité du mélange** : Malgré ces légères variations, les mélanges ont conservé leur homogénéité et leur facilité de mise en œuvre sans apparition de phénomènes de ségrégation.

IV.3.Comportement du mortier à l'état solide :

Après 24 heures de coulage des différents échantillons, les moules ont été retirés et les échantillons ont séché à l'air libre. Des essais de traction, de flexion et de compression ont ensuite été réalisés sur des périodes de 7, 28 et 60 jours.

Le retrait de surface a été mesuré à 2, 3, 7, 14 et 28 jours. Le test de vitesse du son a été effectué à 7, 14 et 28 jours.

Le test d'absorption capillaire a été réalisé sur des périodes de 15, 30, 60, 120, 240, 480 et 1440 minutes.

IV.3.1. Résistance à la flexion :

Cette expérience visait à mesurer la résistance à la flexion d'échantillons de mortier de $16 \times 4 \times 4$ cm préparés avec différentes proportions de poudre de brique et de poudre de résidu de béton, à savoir 10 %, 20 % et 30,55 %, comme indiqué précédemment. Ce test est important pour déterminer l'influence des proportions de poudre.

Notre étude a donné les résultats suivants :

A. Déchet de béton (B) :

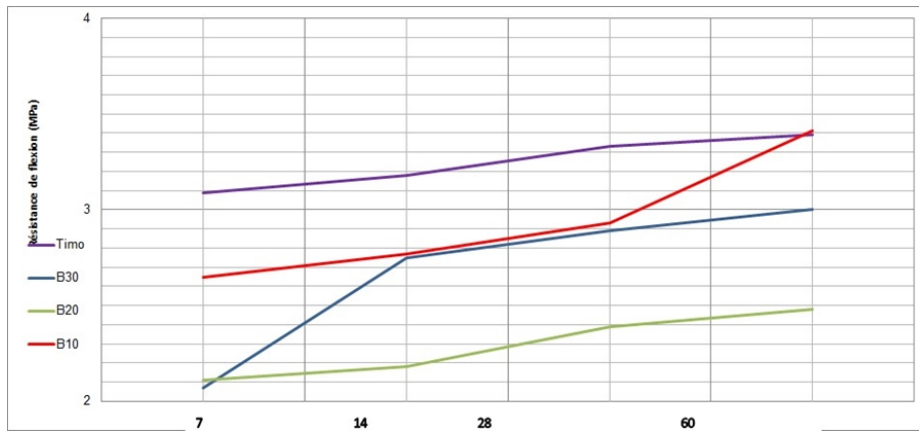


Figure IV.1 : Courbe de la résistance à la flexion en fonction des temps

D'après les résultats, nous observons :

- Nous observons que la résistance augmente avec le temps dans tous les échantillons
- La porosité élevée des granulats de béton recyclés et leur forte capacité d'absorption d'eau. Cela entraîne un affaiblissement de la zone de transition inter faciale (ITZ) entre la pâte de ciment et les granulats, réduisant ainsi la résistance à la flexion.
- Une diminution nette de la résistance par rapport à l'échantillon de référence (Timo) pour tous les taux de substitution.
- Supériorité de la courbe rouge (B10) par rapport au témoin (Timo) et aux autres mélanges à la fin de la période d'essai.
- Intersection de la courbe B10 avec la courbe Timo, suivie d'une ascension au-dessus de celle-ci après avoir été inférieure durant les premiers jours.
- Maintien des courbes à fortes teneurs (B20 et B30) à des niveaux inférieurs à celui du témoin tout au long de l'expérience.
- Persistance de la trajectoire ascendante de la courbe B10 de manière marquée

jusqu'au dernier point de mesure.

Cela est dû à :

- Le taux de 10% est considéré comme le dosage optimal ayant amélioré les propriétés mécaniques par le remplissage des pores et le renforcement de la structure interne du mortier.
- Le retard initial suivi de la supériorité ultérieure est attribué à la lenteur des réactions chimiques des ajouts par rapport au ciment, dont l'efficacité augmente avec le temps.
- L'augmentation du taux d'ajout au-delà d'un certain seuil entraîne une chute de la résistance, due à une demande accrue en eau ou à un déficit en liant principal.
- L'ascension continue de la courbe rouge indique que l'échantillon n'a pas encore atteint son stade de stabilisation finale, ce qui suggère une amélioration continue de la résistance à long terme.

B. Déchet de béton traités thermiquement (Br) :

D'après les résultats, nous notons que :

* Ce type présente la meilleure performance, où l'on remarque que les courbes (Br10%, Br20%) se situent au-dessus ou très proches de l'échantillon de référence.

Selon les données présentées, le mélange Br20 (courbe verte) constitue l'option optimale pour obtenir la résistance à la flexion la plus élevée, surpassant de manière nette et continue l'échantillon témoin (Timo) tout au long de la période d'essai.

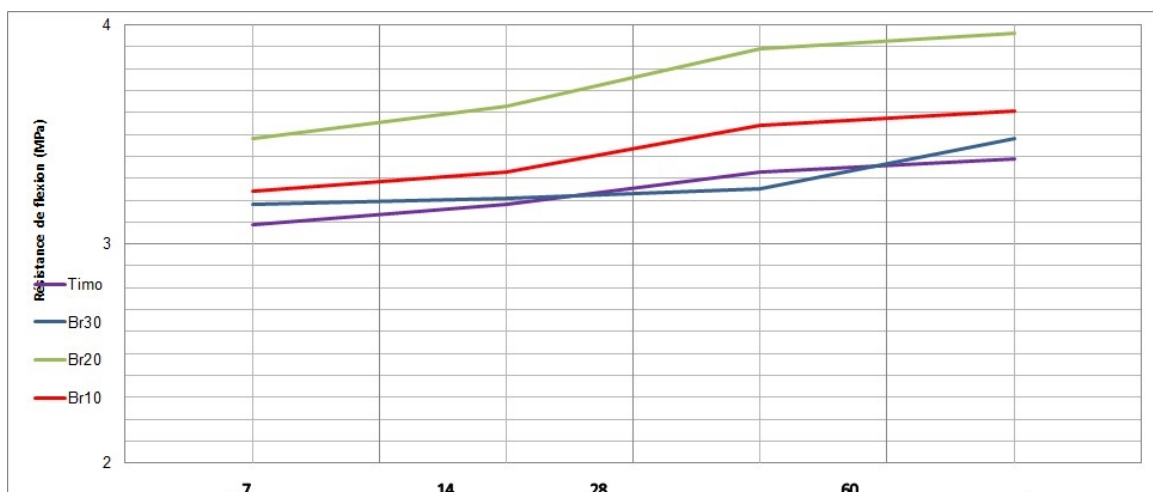


Figure IV.2: Courbe de résistance à la flexion en fonction des temps Br

Cela est dû à :

* Cette supériorité est due à l'atteinte du dosage idéal d'ajouts, ce qui a renforcé la cohésion interne du mortier et amélioré sa microstructure au fil du temps, permettant ainsi de dépasser durablement les performances de l'échantillon de référence.

* Le traitement thermique aide à activer les propriétés pouzzolaniques latentes du vieux ciment présent dans les Déchet. Il contribue également à réduire l'humidité et la porosité, améliorant ainsi l'adhérence et la résistance mécanique.

C. Déchet de brique (Bc) :

D'après les résultats, nous notons :

* Nous observons que la résistance augmente avec le temps dans tous les échantillons

* Une performance moyenne, avec une baisse significative au taux de substitution le plus élevé (Bc30%).

* L'échantillon Bc10 présente le meilleur résultat par rapport au témoin (Timo) ; bien que le témoin ait affiché une résistance supérieure durant les premières semaines, Bc10 a manifesté une capacité exceptionnelle à développer sa performance pour devenir la plus résistante à l'échéance de 60 jours.

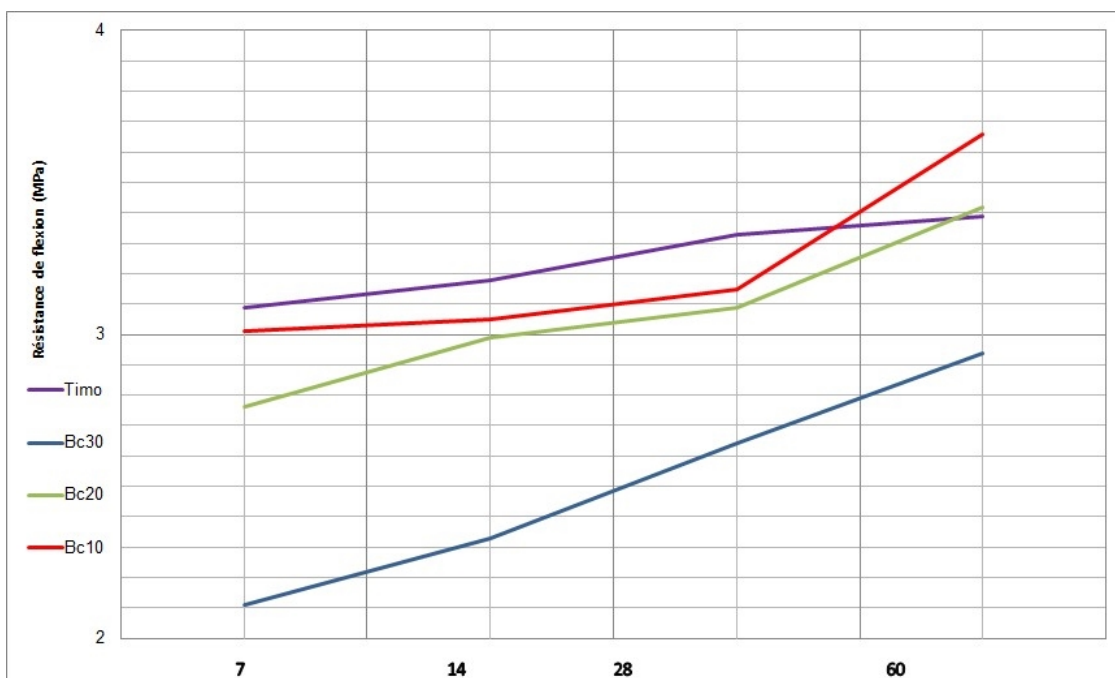


Figure IV.3: Courbe de résistance à la flexion en fonction des temps Bc

Cela est dû à :

*Cela s'explique par le fait que le mélange Bc10 bénéficie d'un taux de croissance continu de ses propriétés mécaniques au fil du temps, ce qui lui a permis de surpasser la courbe de l'échantillon de référence, alors que les autres variantes (Bc20 et Bc30) sont restées à un niveau de performance inférieur au témoin pendant toute la durée de l'essai.

* La poudre de brique possède des propriétés pouzzolaniques naturelles, mais à un taux de 30%, la demande en eau augmente et l'ouvrabilité est affectée, ce qui impacte négativement la résistance.

D. Déchet de brique traités thermiquement (Brc) :

Nous remarquons que :

* Nous observons que la résistance augmente avec le temps dans tous les échantillons

* Les résultats sont très proches et stables autour de la valeur de 3 MPa.

*L'échantillon Brc10 a surpassé le témoin Timo et tous les autres mélanges à la fin de la période d'essai (60 jours).



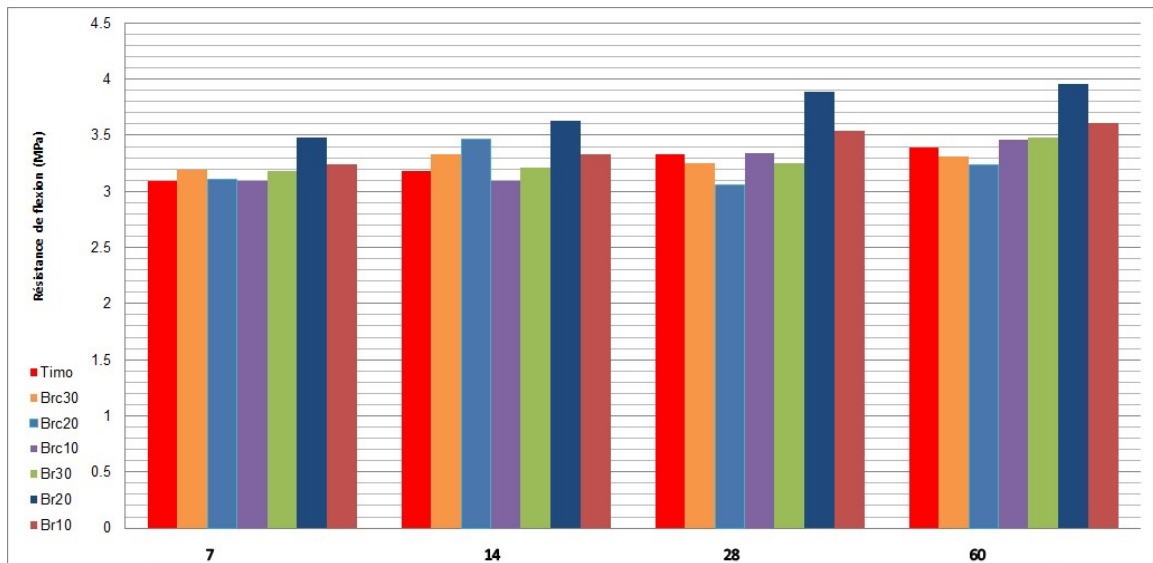
Figure IV.4: Courbe de résistance à la flexion en fonction des temps Brc

Cela est dû à :

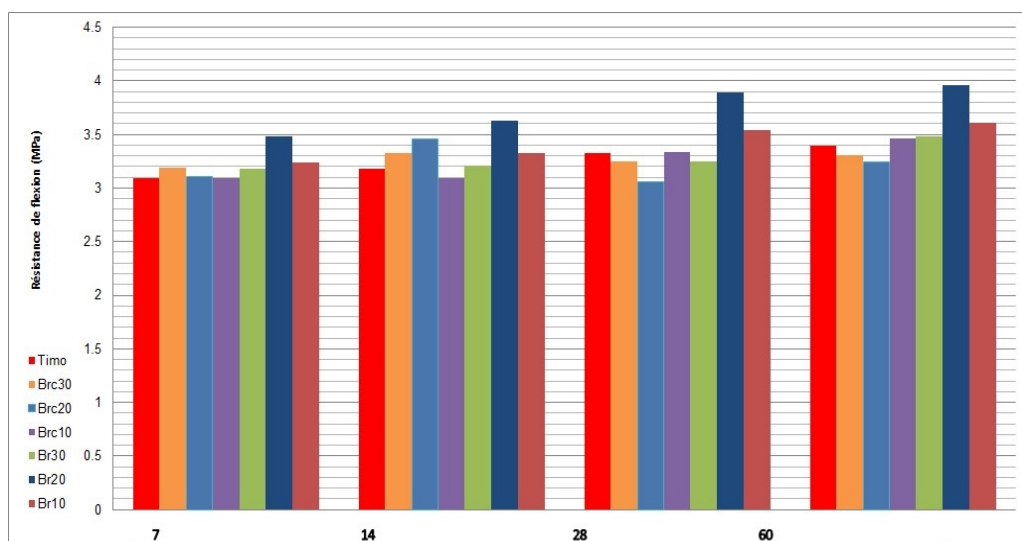
*Malgré les fluctuations des autres échantillons, le dosage de 10% de Brc a montré

une croissance continue et stable, ce qui en fait le taux optimal pour obtenir une résistance maximale à long terme.

* Le traitement thermique de la brique concassée crée un équilibre entre sa réactivité pouzzolanique et son absorption d'eau, rendant les résultats stables et comparables à l'échantillon témoin malgré les ajouts.



FigureIV.5:La courbe comparative de la résistance à la flexion illustre les mortiers B et Bc



FigureIV.6:Courbe comparative de la résistance à la flexion en fonction des temps Br et Brc

. Analyse de l'effet des taux de substitution (10%, 20%, 30%)

En comparant les taux sur toutes les courbes, nous établissons la règle générale

suivante :

. **Taux optimal (10% - 20%)** : Dans la plupart des cas (particulièrement Br et Brc), ces taux maintiennent une performance mécanique proche ou supérieure à la référence. Cela indique que le mortier peut absorber cette quantité sans dégradation des propriétés.

. **Taux élevé (30%)** : Nous observons pour les courbes (B) et (Bc) que le taux de 30% mène systématiquement aux valeurs de résistance les plus faibles. Cela est dû à l'effet de dilution, où la quantité de ciment primaire diminue au profit d'un matériau mécaniquement moins efficace.

. Interprétation générale

* Nous remarquons que toutes les courbes suivent une progression ascendante du 7ème au 28ème jour. Cela témoigne de la continuité du processus d'hydratation et de la formation des cristaux de C-S-H, responsables de la solidité.

* L'effet du traitement thermique : En comparant (B avec Br) et (Bc avec Brc), il apparaît clairement que le traitement thermique a amélioré la qualité des déchets en les rendant plus réactifs et plus homogènes au sein de la matrice cimentaire.

. Conclusion finale

Les meilleurs résultats ont été obtenus avec les déchets de béton traités thermiquement (Br) à un taux de substitution de 20%, affichant une résistance à la flexion supérieure. En revanche, l'utilisation de déchets de béton brut (B) à 30% constitue l'option mécaniquement la plus faible. Ces résultats prouvent la faisabilité de la valorisation de ces déchets pour la production de mortiers durables, avec une préférence pour le traitement thermique afin d'optimiser les performances.

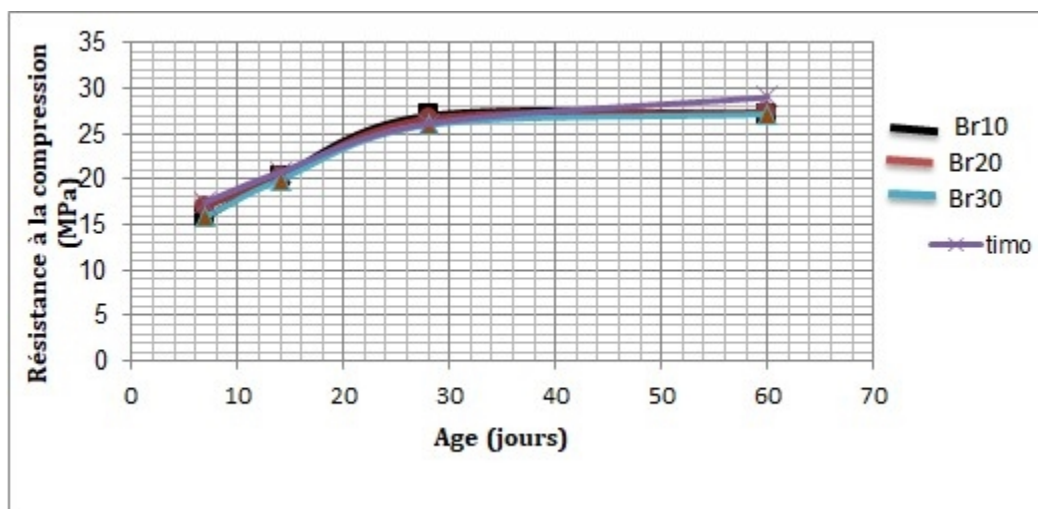
IV.3.2. Résistance à la Compression :

Il s'agit d'un essai visant à mesurer la capacité de charge (portance) d'échantillons préalablement préparés. Les résultats de ces tests sont utilisés dans l'industrie de la construction pour évaluer la qualité et la résistance du mortier, et déterminer son aptitude à être utilisé dans divers projets de génie civil. Ces résultats jouent un rôle

crucial dans le choix des matériaux de construction appropriés en fonction des conditions environnementales de l'ouvrage, tout en améliorant la sécurité et la durabilité des structures bâties.

1. Courbe des déchets de briques (Br - Briques)

Cette courbe représente l'utilisation de la poudre de brique (brique rouge broyée) comme substitut partiel au ciment.



FigureIV.7:Courbe de la résistance à la compression en fonction des temps Br

Observations des résultats :

- L'échantillon témoin (tino) présente la résistance à la compression la plus élevée à 60 jours, tandis que la courbe Br10 se distingue comme la meilleure variante parmi les ajouts, montrant les performances les plus proches et les plus stables par rapport au témoin tout au long de l'essai.
- Toutes les proportions (10%, 20%, 30%) présentent des résistances similaires à l'âge de 7 jours (environ 15-17 MPa).
- À 28 et 60 jours, la courbe correspondant à 10% (Br10) se distingue nettement, s'approchant de l'échantillon témoin (tino) à environ 28 MPa.
- Nous observons que la résistance augmente avec le temps dans tous les échantillons
- Le taux de 30% (Br30) a enregistré les valeurs de résistance les plus faibles durant toute la période d'essai.

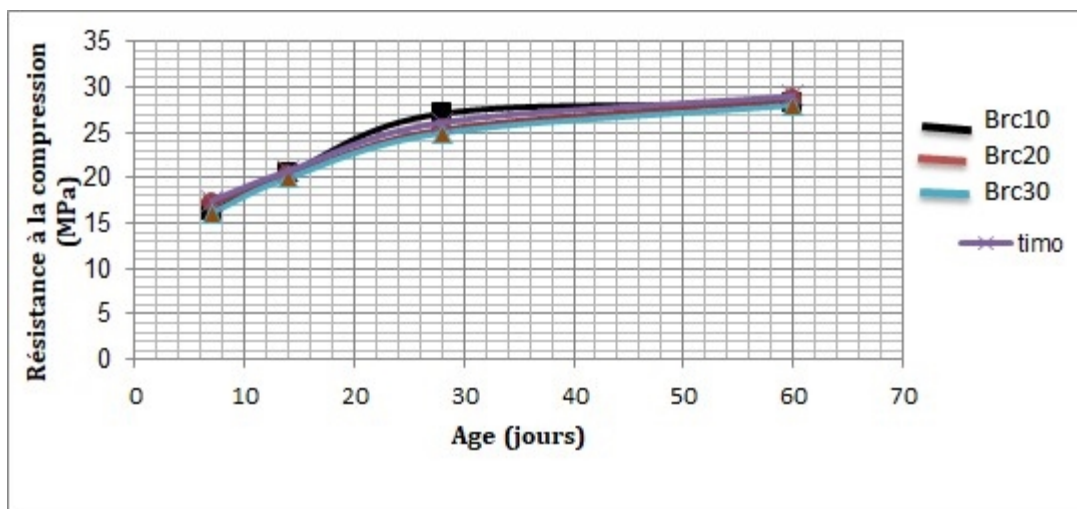
Interprétation :

L'augmentation de la résistance au fil du temps pour toutes les courbes est due à la poursuite du processus d'hydratation du ciment, alors que la diminution des performances pour Br20 et Br30 suggère qu'un taux de remplacement plus élevé affecte négativement la compacité et la cohésion interne du mortier par rapport aux autres échantillons.

La poudre de brique est une matière pouzzolanique active. À de faibles dosages (10%), elle comble les vides microscopiques et réagit avec l'hydroxyde de calcium issu de l'hydratation du ciment, renforçant ainsi la matrice. À un taux élevé (30%), la quantité réelle de ciment devient insuffisante et la poudre de brique absorbe une partie de l'eau de réaction, entraînant une chute de la résistance.

2. Courbe des briques calcinées (Brc - Briques Calcinées)

Cette courbe représente les déchets de briques ayant subi un traitement thermique supplémentaire avant leur intégration.



FigureIV.8: Courbe comparative de la résistance à la compression en fonction des temps Brc

Observations :

- Nous observons que la résistance augmente avec le temps dans tous les échantillons.
- La courbe Brc10 (en noir) présente les performances les plus élevées en termes de résistance à la compression par rapport au témoin (timo) et aux autres mélanges, particulièrement à l'échéance de 28 jours.

- Le taux de substitution de 10% (Brc10) présente une parité technique quasi absolue avec le comportement de l'échantillon de contrôle après 28 jours de cure.
- Une très forte convergence est observée entre tous les taux de substitution et l'échantillon témoin.
- Les résultats de la résistance mécanique du mélange à 10% (Brc10) sont en parfaite corrélation avec ceux de l'éprouvette témoin à l'échéance de 28 jours.
- Amélioration notable des performances à 20% par rapport à la brique non traitée.

Interprétation

- L'amélioration de la résistance pour l'échantillon Brc10 s'explique par l'effet de remplissage (filler effect) et l'activité pouzzolanique des fines, qui densifient la matrice cimentaire. En revanche, l'augmentation du taux de substitution dans les variantes Brc20 et Brc30 entraîne une dilution du clinker, ce qui réduit la résistance mécanique par rapport au mélange de référence.

Le traitement thermique "active" la silice et l'alumine présentes dans la brique, rendant sa réaction pouzzolanique plus rapide et plus intense. Cette activité chimique compense le déficit en ciment, conférant au mortier une haute efficacité mécanique même avec des taux de substitution moyens.

3. Courbe du béton concassé (Bc - Béton concassé)

Représente l'utilisation de Déchet de vieux bétons broyés comme substitut.

Observations :

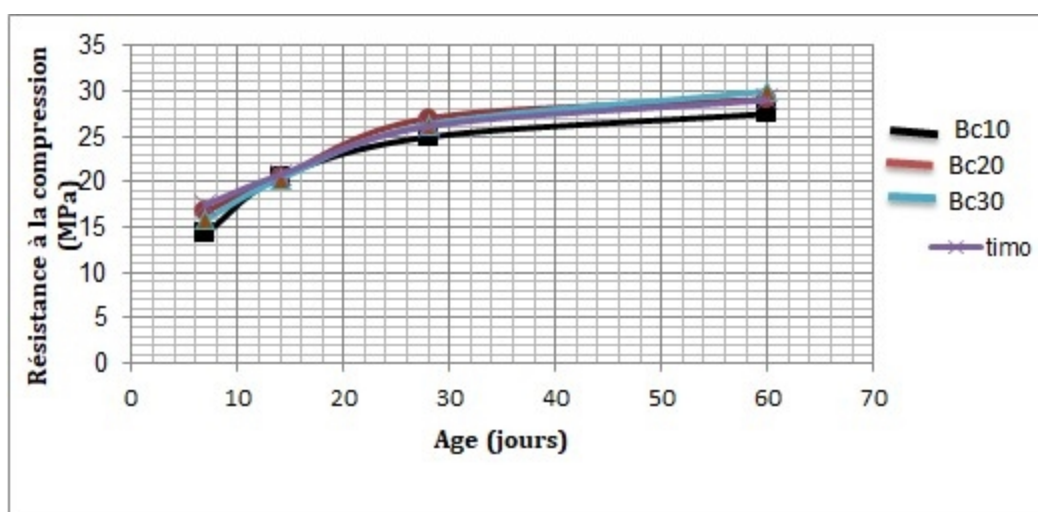


Figure IV.9: Courbe de résistance à la compression en fonction des temps Bc

- Nous observons que la résistance augmente avec le temps dans tous les échantillons
- L'échantillon Bc30 a surpassé le témoin timo en termes de résistance à la compression à l'âge de 60 jours, tandis que l'échantillon Bc10 a enregistré la résistance la plus faible durant toutes les phases de l'essai.
- On observe un comportement différent : les taux de 30% (Bc30) et 20% (Bc20) ont donné d'excellents résultats, surpassant parfois le taux de 10%.
- Les courbes sont très resserrées au-dessus de la barre des 25 MPa à l'âge de 60 jours.

Interprétation

Interprétation : L'amélioration de la résistance, particulièrement pour le Bc30, est due à la poursuite des réactions d'hydratation et à l'effet de remplissage (filling effect) de la poudre fine de brique recyclée, ce qui réduit la porosité et renforce la microstructure du mortier par rapport au témoin.

Les Déchet de béton contiennent des granulats fins et de l'ancienne pâte de ciment. Ces particules agissent comme des "sites de nucléation" qui accélèrent la croissance des nouveaux cristaux de ciment. De plus, le broyage assure une distribution granulométrique qui améliore la compacité du mélange (effet de remplissage), permettant d'atteindre 30% de substitution sans perte majeure de performance.

4. Courbe des résidus généraux / Ciment composé (B - Béton/Mélange)

Cette courbe représente généralement le mélange de base des résidus avant traitements spécifiques.

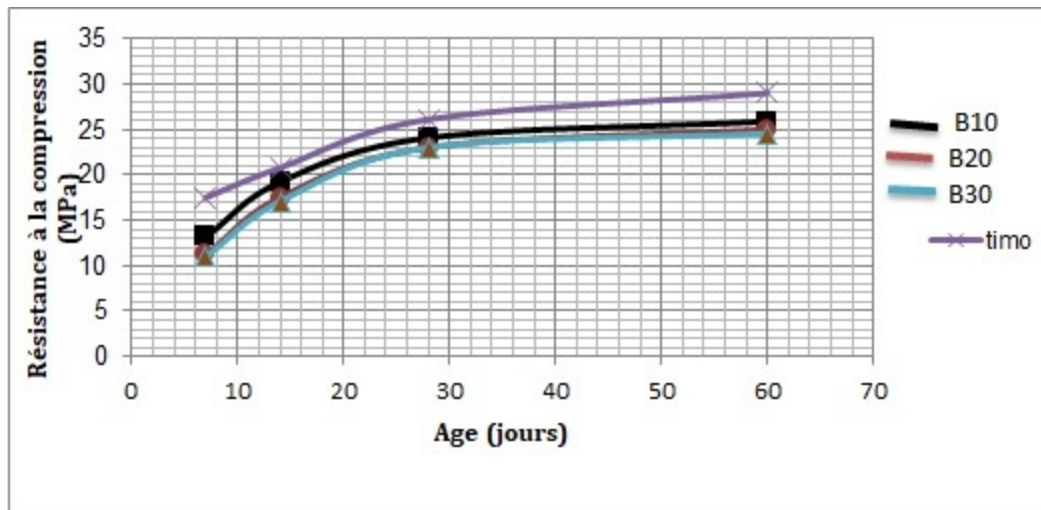


Figure IV.10: La courbe de résistance à la compression en fonction des temps B

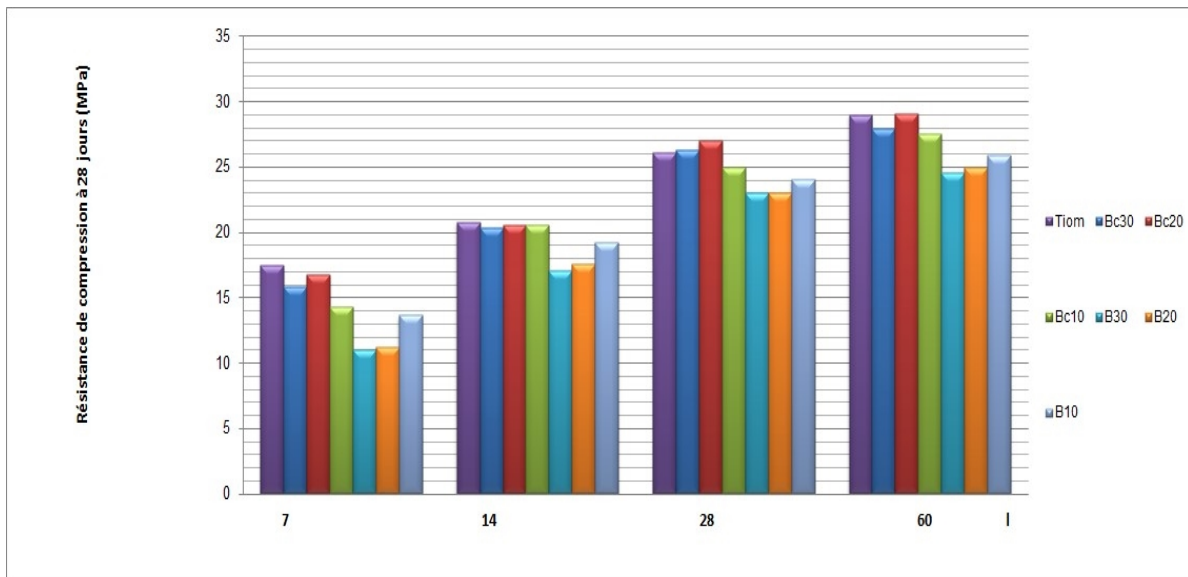
Observations :

- Un écart net apparaît entre l'échantillon témoin (timo) et les échantillons de résidus (B10, B20, B30).
- On constate que la courbe du témoin (timo) est nettement supérieure aux autres courbes (B10, B20, B30), enregistrant les valeurs de résistance à la compression les plus élevées à tous les âges d'essai (7, 14, 28 et 60 jours).
- Le témoin reste systématiquement le plus performant, tandis que la résistance diminue progressivement avec l'augmentation du taux de résidus.
- La courbe bleue (B30) est nettement la plus faible, stagnant sous les 25 MPa.

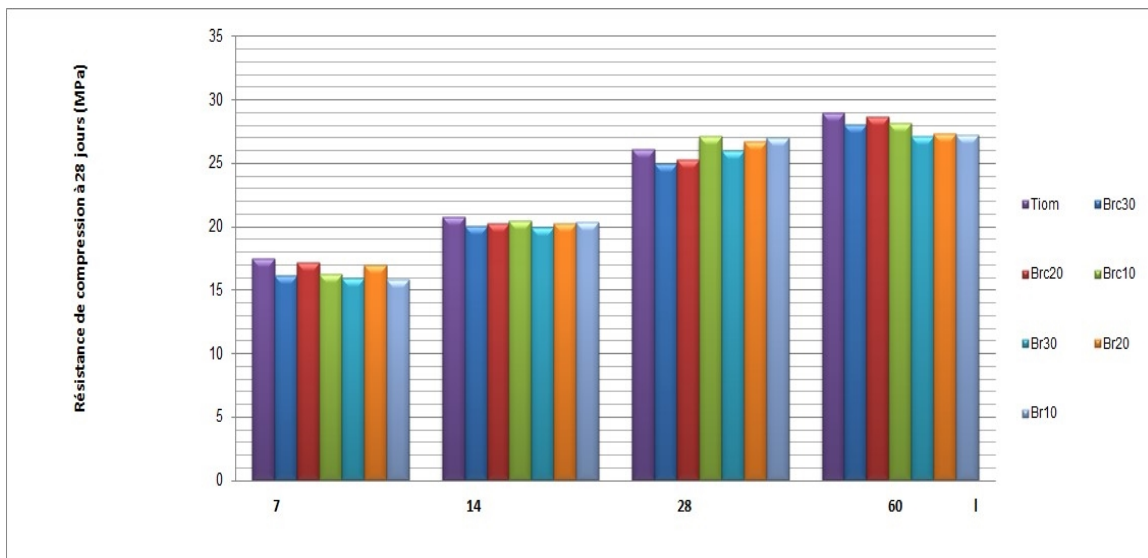
Interprétation

Cette supériorité s'explique par le fait que timo représente le mélange de référence, tandis que l'incorporation de matériaux recyclés dans les autres mélanges entraîne une diminution progressive de la résistance mécanique à mesure que le taux de substitution augmente.

En l'absence de traitement thermique ou d'optimisation chimique, ces résidus agissent uniquement comme des fillers (matières de remplissage) et non comme des liants. Plus le taux de substitution augmente, plus la porosité de la structure s'accroît, réduisant la capacité à supporter les contraintes mécaniques par rapport au ciment pur.



FigureIV.11:Courbe comparative de la résistance à la compression en fonction des temps B et Bc



FigureIV.12:Courbe comparative de la résistance à la compression en fonction des temps de Br et Brc

Synthèse de l'étude :

Les courbes illustrent l'évolution de la résistance à la compression en fonction de l'âge pour des mortiers de ciment contenant différents taux de substitution (10%, 20%, 30%) de Déchet (béton et brique).

Comparaison des taux de substitution (10%, 20%, 30%)

1. Taux de 10% (Ligne noire) : Toujours le plus proche du témoin (tmo), voire supérieur. La substitution partielle améliore la densité sans affaiblir les liaisons chimiques.

2. Taux de 20% (Ligne rouge) : Représente le "point d'équilibre" (compromis technico-environnemental), offrant une résistance acceptable dépassant 25 MPa.

3. Taux de 30% (Ligne bleue) : Enregistre les valeurs les plus basses. L'excès de matériaux recyclés augmente la porosité et fragilise le "squelette structurel" du ciment original.

Analyse Globale

Toutes les courbes présentent un comportement classique des matériaux cimentaires : une croissance rapide de la résistance durant les premiers jours (7 à 28 jours) due à l'accélération de l'hydratation, suivie d'une stabilisation progressive vers l'âge de 60 jours.

Conclusion

L'étude expérimentale met en évidence l'efficacité mécanique remarquable des matériaux recyclés ayant subi un traitement thermique (poudre de brique calcinée et béton recyclé), qui se traduisent par une stabilité volumétrique et des performances mécaniques supérieures à celles des matériaux bruts. Ces formulations, intégrant des taux de substitution partielle du ciment compris entre 10% et 20%, s'avèrent parfaitement exploitables pour les applications courantes du génie civil ; elles atteignent en effet une résistance à la compression (R_c) optimale de 25 à 28 MPa à l'échéance de 28 jours, ce qui est conforme aux standards des mortiers et bétons conventionnels. Cette approche constitue une valorisation effective des sous-produits solides en tant qu'additions minérales actives, permettant d'optimiser les coûts économiques des projets de construction tout en réduisant l'empreinte écologique globale. De plus, la garantie de la qualité du matériau implique impérativement un contrôle rigoureux de la cinétique d'absorption d'eau de ces granulats et fines recyclés en raison de leur porosité élevée, ainsi qu'un ajustement précis du rapport eau/liant

(E/C) afin de prévenir toute dégradation de l'ouvrabilité (workability) à l'état frais.

IV.3.3. Mesure du retrait :

Le retrait est la réduction de volume qui se produit dans les matériaux cimentaires lors du séchage et du durcissement. Ce processus peut entraîner des fissures et une diminution des performances structurales d'un bâtiment s'il n'est pas correctement maîtrisé. Le taux de retrait est influencé par plusieurs facteurs, notamment le rapport eau/ciment, le type de ciment utilisé et les adjuvants chimiques tels que les superplastifiants et les ajouts minéraux. Cette expérience constitue une étape cruciale pour comprendre l'impact de ces facteurs sur la qualité et la résistance du béton.

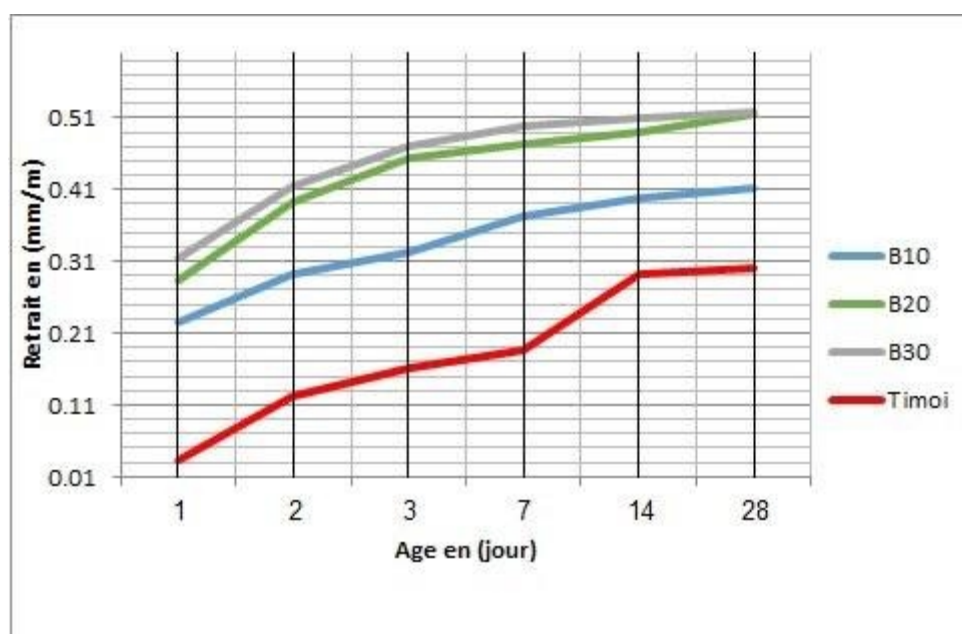
Les résultats obtenus contribueront à améliorer les pratiques de construction et l'utilisation plus efficace des matériaux de construction,

ce qui favorisera le développement de structures plus sûres et plus durables.

Notre étude a donné les résultats suivants :

Les courbes représentent le phénomène de retrait (Retrait) dans différents mélanges de mortier ou de béton comparés à un échantillon témoin (Témoin) sur une période de 28 jours.

a. Déchets de béton (B)



FigureIV.13: Courbe de retrait illustre les en fonction des tempsB

On remarque que :

Ces échantillons présentent les valeurs de retrait les plus élevées ; les courbes (B10, B20, B30) se situent entièrement au-dessus de la courbe de l'échantillon témoin (Témoin).

Les résultats montrent que tous les échantillons contenant des ajouts (B10, B20, B30) présentent des valeurs de retrait nettement plus élevées que l'échantillon témoin (Timo) tout au long des 28 jours d'essai.

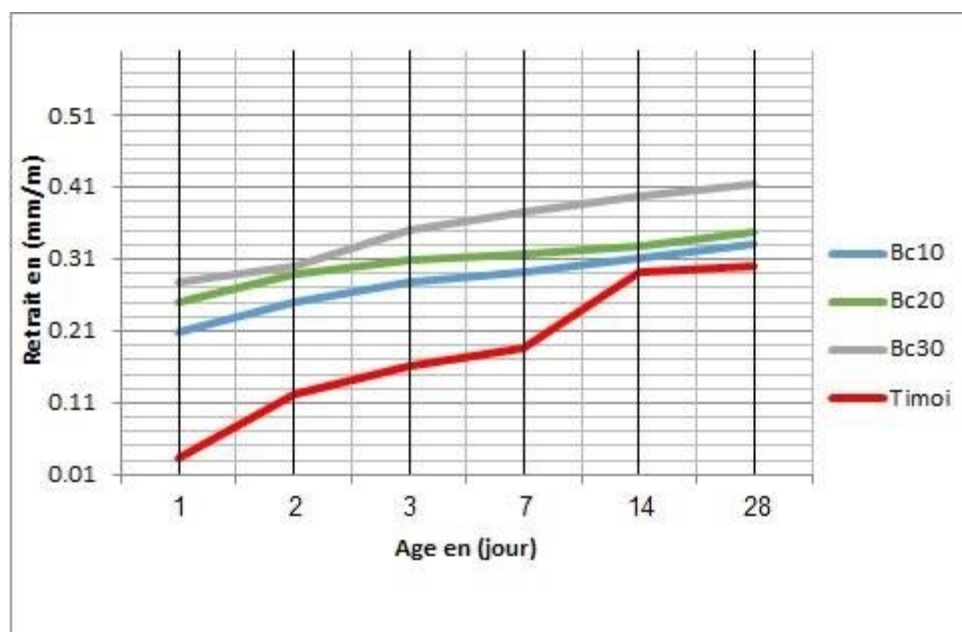
Il existe une relation proportionnelle claire : plus le taux d'ajout augmente (de 10 % à 30 %), plus le retrait augmente de manière significative pour atteindre environ 0,51 mm/m à 28 jours.

Cela est dû au fait que :

Cette augmentation des valeurs de retrait est due à l'influence des matériaux ajoutés sur la porosité et les réactions d'hydratation au sein du mortier, ces valeurs augmentant proportionnellement avec le taux d'incorporation dans le mélange.

Le matériau ajouté dans ce groupe augmente la porosité ou consomme une plus grande quantité d'eau libre, ce qui entraîne un séchage interne plus rapide et donc un retrait plus important.

b. Déchets de béton traités (Bc)



FigureIV.14: Courbe de retrait illustre les résultats en fonction des temps Bc.

On remarque que :

Les valeurs sont ici intermédiaires (entre 0,31 et 0,41 mm/m). Les courbes restent supérieures à celle de l'échantillon témoin.

La courbe montre que l'échantillon témoin (Timo) enregistre les valeurs de retrait les plus faibles durant toute la période d'essai par rapport aux autres échantillons (Bc10, Bc20, Bc30), dont les valeurs de retrait augmentent proportionnellement avec le taux d'ajout.

L'ordre croissant du retrait suit la concentration : Bc30 est le plus élevé, suivi de Bc20 puis Bc10.

Cela peut s'expliquer par :

L'utilisation du type « Bc » améliore légèrement la stabilité du béton par rapport au type « B », mais il provoque toujours un retrait supérieur à celui du béton ordinaire, probablement à cause de réactions chimiques augmentant la densité de la pâte cimentaire et sa tension superficielle.

Interprétation : Ces résultats sont dus au fait que le remplacement du matériau de base par des déchets recyclés augmente la porosité du mélange ou sa demande en eau, ce qui entraîne un coefficient de retrait plus élevé par rapport au mélange de référence (Timo).

c. Déchets de brique (Br)

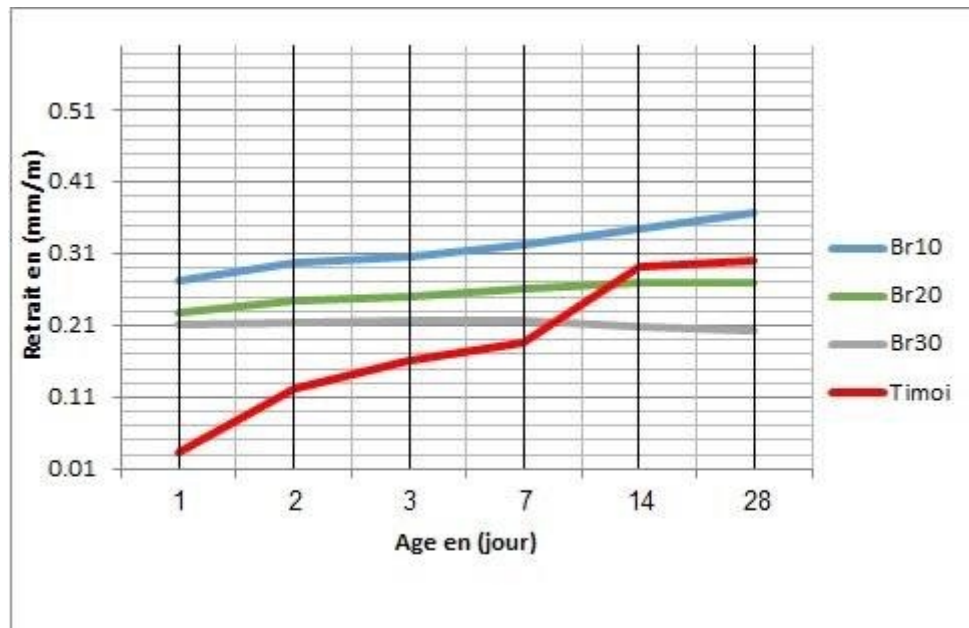


Figure IV.15: Courbe de retrait illustre les résultats en fonction des temps Br

On remarque que :

Ce groupe présente un comportement différent : les courbes Br10 et Br20 sont supérieures à celle du témoin, tandis que la courbe Br30 croise celle du témoin puis se stabilise en dessous à partir du 14^e jour.

L'échantillon Br30 présente les valeurs de retrait les plus faibles à l'âge de 28 jours par rapport au témoin (Timo) et aux autres variantes.

L'augmentation du dosage à 30 % dans ce type a permis de limiter le retrait à long terme (après 7 jours).

Cela est dû au fait que :

Le matériau « Br » à forte concentration peut agir comme un filler réduisant les vides, ou posséder une capacité de rétention d'eau diminuant ainsi le retrait de séchage.

Interprétation : La stabilisation de la courbe Br30 en dessous du témoin après le 7^{ème} jour indique que l'incorporation de ce taux de substituant améliore la stabilité dimensionnelle du mortier en réduisant efficacement son retrait.

d. Déchets de brique traités (Br)

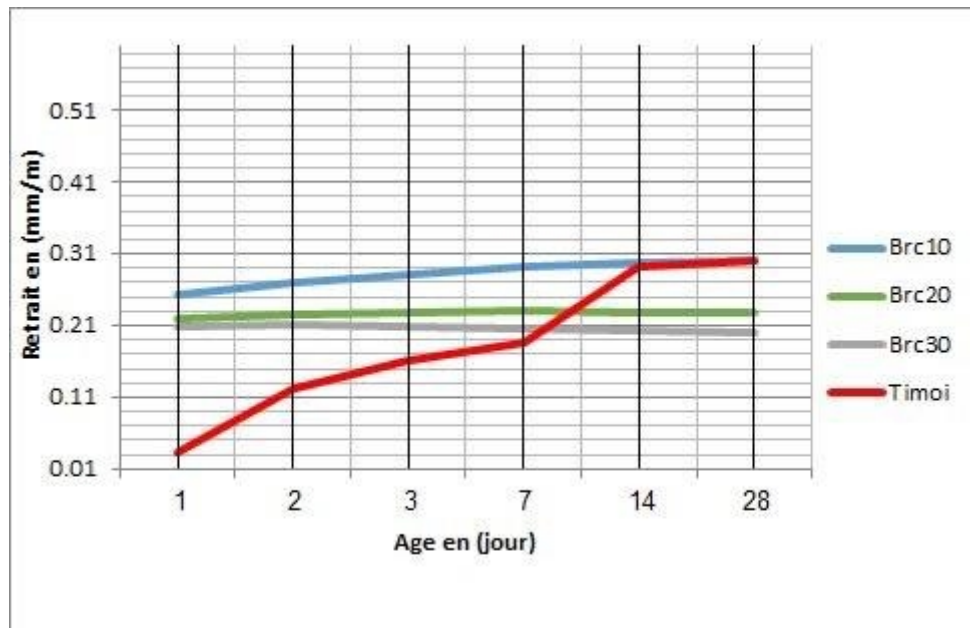


Figure IV.16: Courbe de retrait illustre les résultats en fonction des temps Brc

On remarque que :

Ce groupe présente la meilleure stabilité. Les courbes Brc20 et Brc30 sont très stables et se situent en dessous de la courbe de l'échantillon témoin après le 14^e jour.

On constate que l'échantillon témoin (Timoi) présente le retrait le plus faible au cours des premiers jours, mais il augmente de manière significative pour dépasser tous les autres échantillons au 28^e jour, tandis que l'échantillon Brc30 maintient les niveaux de retrait final les plus bas avec une stabilité remarquable par rapport au témoin et aux autres mélanges.

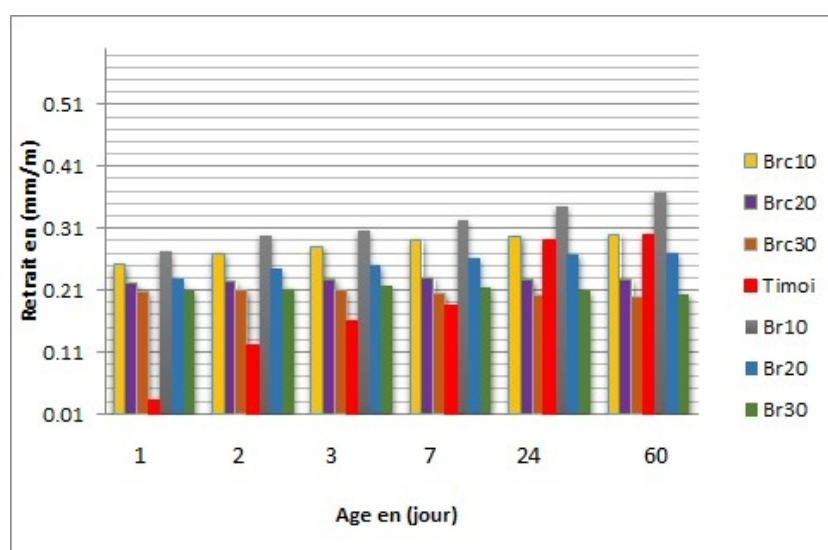
Le mélange Brc10 est le seul à dépasser le témoin, tandis que les dosages élevés (20 % et 30 %) donnent d'excellents résultats dans la réduction du retrait final.

Cela est dû au fait que :

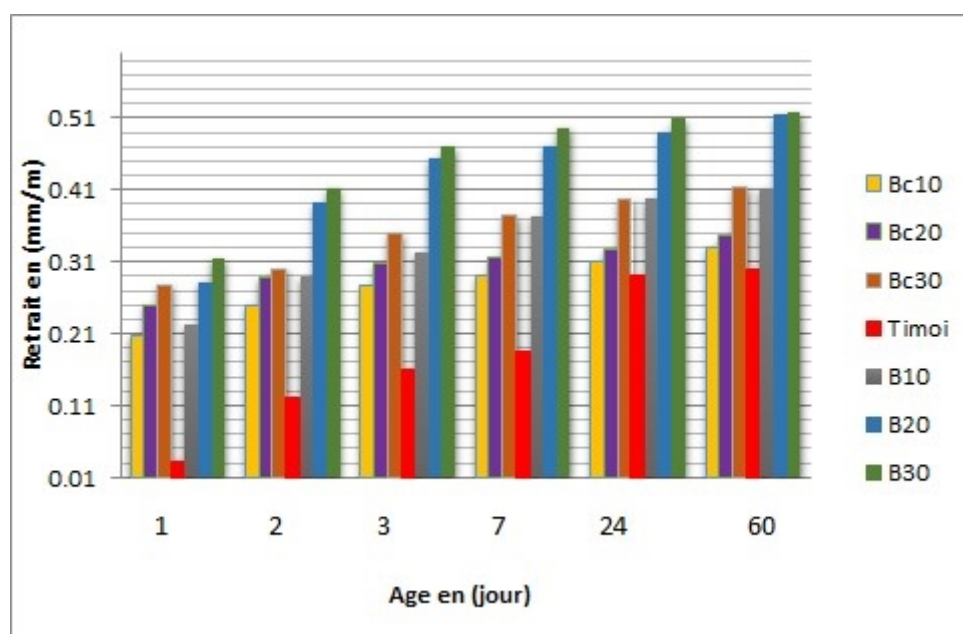
Les propriétés du matériau « Brc » ont produit un effet synergique améliorant la microstructure du béton, réduisant les vides et limitant la perte d'eau.

La réduction du retrait dans les échantillons (Brc) par rapport au témoin à long terme est attribuée au rôle des granulats recyclés (tels que la brique concassée و la poudre de béton) dans l'amélioration de la structure interne du mortier, car ces matériaux agissent pour réduire les pores capillaires et limiter le mouvement de l'eau, ce qui réduit la

contraction volumique due au séchage par rapport au mortier conventionnel



FigureIV.17:Courbe comparant les résultats de retrait en fonction des temps Br et Brc illustre



FigureIV.18:Courbe comparant les résultats de retrait en fonction des temps B et Bc illustre

. Comparaison générale (Résumé des résultats)

En effectuant une comparaison générale entre toutes les données, on constate que les déchets de béton « B » ont l'effet le plus défavorable sur le retrait du béton, atteignant une valeur maximale de 0,51 mm/m. Ils sont suivis par le groupe des déchets de béton

traités « Bc », avec une valeur maximale de 0,41 mm/m.

En revanche, une amélioration notable est observée avec le groupe des déchets de brique « Br », qui a limité le retrait à environ 0,36 mm/m. Le meilleur comportement est obtenu avec les déchets de brique traités thermiquement « Brc », qui non seulement réduisent les valeurs de retrait, mais permettent également d'obtenir un retrait final (pour les dosages de 20 % et 30 %) inférieur à celui de l'échantillon témoin lui-même, avec une stabilisation autour de 0,30 mm/m pour le faible dosage et les valeurs les plus faibles pour Brc30.

Conclusions générales

Comportement de l'échantillon témoin (Témoin)

Dans toutes les figures, le retrait commence par une valeur très faible (environ 0,01), puis augmente rapidement jusqu'au 14^e jour avant de se stabiliser. Il s'agit du comportement normal d'un béton traditionnel.

Effet des matériaux ajoutés

Les déchets de béton accélèrent le processus de retrait dès les premiers jours.

Les matériaux issus des déchets de brique (surtout à 30 %) agissent comme des compensateurs de retrait (Shrinkage Compensating) et sont les plus adaptés pour les structures nécessitant une grande stabilité dimensionnelle et la prévention des fissures.

Point critique

La majorité des variations importantes du retrait se produit durant les 14 premiers jours ; au-delà, toutes les courbes tendent à se stabiliser (plateau), ce qui indique que les principales réactions hydrauliques sont pratiquement achevées.

Conclusion finale

Période critique : le retrait est très rapide durant les 7 premiers jours, puis il ralentit progressivement jusqu'au 28^e jour.

Recommandation technique : d'après cette analyse, il est recommandé d'utiliser le type « Brc » avec un dosage de 30 % afin d'assurer la meilleure stabilité dimensionnelle et de limiter l'apparition des fissures dans les structures en béton.

IV.3.4. Mesure de la vitesse de propagation du son

Il s'agit d'une expérience physique visant à mesurer la vitesse de propagation des ondes (telles que le son) dans différents milieux ou sous des conditions variables. L'expérience repose sur l'observation de la relation entre la distance parcourue et le temps écoulé, où la vitesse est représentée par la pente de la courbe dans le graphique.

D'après notre étude, nous avons obtenu les résultats suivants :

La courbe représente les variations de la vitesse du son pour le mortier composé de Déchet de poudres (Béton - Brique) en fonction du temps.

Commentaire sur les courbes par rapport au témoin

Déchets de brique traités (Brc)

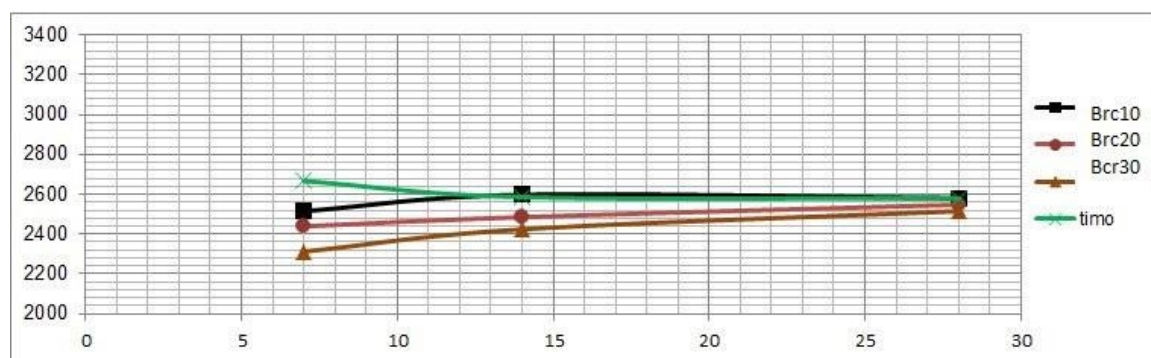


Figure IV.19: Courbe illustre les résultats concernant la vitesse de propagation en fonction des temps de Brc.

On remarque que :

L'axe horizontal représente l'âge des éprouvettes en jours (7, 14 et 28 jours), tandis que l'axe vertical représente la vitesse de propagation des ultrasons (m/s).

On remarque que l'échantillon témoin « Témoin » enregistre la vitesse la plus élevée à 7 jours avec environ 2650 \, m/s, puis la vitesse se stabilise avec une légère diminution jusqu'à atteindre environ 2580 \, m/s à 28 jours.

Pour les échantillons Brc10, Brc20 et Brc30, on observe une augmentation progressive de la vitesse avec le temps, ce qui montre une amélioration de la compacité et de la cohésion interne du mortier au cours de l'hydratation.

On remarque également une relation inverse entre le taux de substitution et la vitesse de propagation : plus le pourcentage de déchets incorporés augmente, plus la vitesse des ultrasons diminue, surtout aux jeunes âges.

Discussion

L'augmentation de la vitesse pour les échantillons Brc est liée à la poursuite des réactions d'hydratation qui produisent des composés cimentaires remplissant les vides du mortier, rendant ainsi la structure plus homogène et plus compacte.

La diminution de la vitesse par rapport au témoin aux jeunes âges est due à la nature poreuse des granulats recyclés (brique ou béton broyé), car les pores dispersent les ondes ultrasoniques et réduisent leur vitesse de transmission.

À 28 jours, les résultats deviennent très proches pour toutes les formulations, avec des vitesses comprises entre 2500 et 2600 \, m/s, ce qui indique que les granulats recyclés développent avec le temps une structure cohérente proche de celle du mortier conventionnel.

Interprétation physique

La vitesse de propagation des ultrasons est directement liée à la densité du matériau et à son module d'élasticité. Ainsi, le remplacement des granulats naturels par des déchets de construction modifie les propriétés du milieu de propagation.

La stabilité de la courbe Témoin indique que l'échantillon atteint rapidement un équilibre structural, tandis que l'évolution croissante des courbes Brc traduit une amélioration progressive de l'adhérence entre la pâte cimentaire et les granulats recyclés, avec un possible effet pouzzolanique.

Déchets de brique (Br)

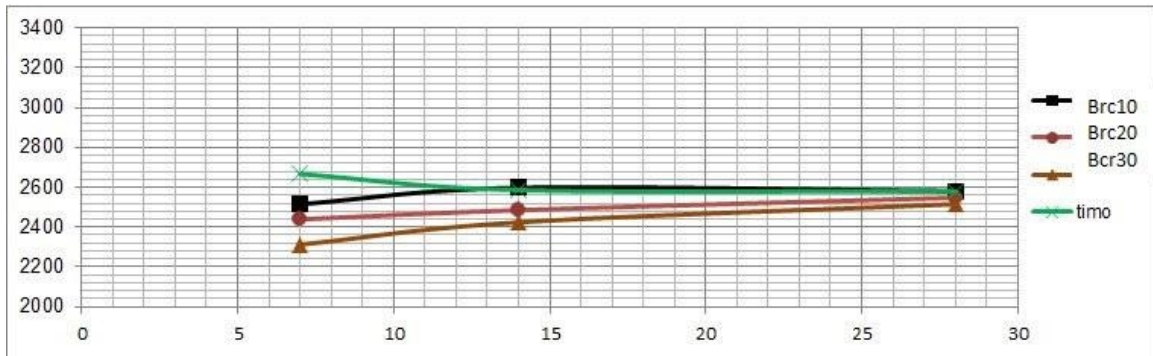


Figure IV.20: Courbe illustre les résultats concernant la vitesse de propagation en fonction des temps de Br.

L'axe horizontal représente le temps de cure des éprouvettes en jours (7, 14 et 28 jours).

On remarque que :

L'axe vertical représente la vitesse de propagation des ultrasons en (m/s).

L'échantillon de référence « Témoin » apparaît en vert avec la vitesse initiale la plus élevée à 7 jours (environ 2650 \, m/s), puis la valeur diminue légèrement pour se stabiliser autour de 2580 \, m/s au 28^e jour.

Les échantillons de substitution Br10, Br20 et Br30 présentent des valeurs inférieures à celles du témoin au jeune âge, puis la vitesse augmente progressivement avec le temps.

On remarque également une évolution inverse selon le taux de substitution : plus le pourcentage de granulats recyclés (Br) augmente, plus la vitesse de propagation des ultrasons diminue.

Discussion

La diminution de la vitesse dans les échantillons contenant des déchets de brique broyée (Br) par rapport au témoin « Témoin » est due à l'augmentation de la porosité interne des granulats recyclés, ce qui perturbe la propagation des ondes ultrasoniques.

L'augmentation progressive de la vitesse des échantillons Br avec le temps traduit l'évolution des réactions d'hydratation, qui permettent de combler les vides capillaires par les produits cimentaires et d'améliorer l'homogénéité du milieu.

La stabilité précoce de l'échantillon Témoin montre que sa structure compacte se

forme plus rapidement, contrairement aux autres formulations qui nécessitent un temps plus long pour atteindre une bonne cohésion.

Interprétation physique

La vitesse de propagation des ultrasons est considérée comme un indicateur direct de la densité, de la rigidité et du module d'élasticité du mortier.

Les valeurs comprises entre 2400 m/s et 2600 m/s classent le mortier dans la catégorie de qualité moyenne selon les normes internationales des essais non destructifs.

La différence des résultats à 7 jours s'explique par la variation de la vitesse des réactions chimiques initiales entre les granulats naturels et les granulats issus des déchets de construction.

Déchets de béton traités (Bc)

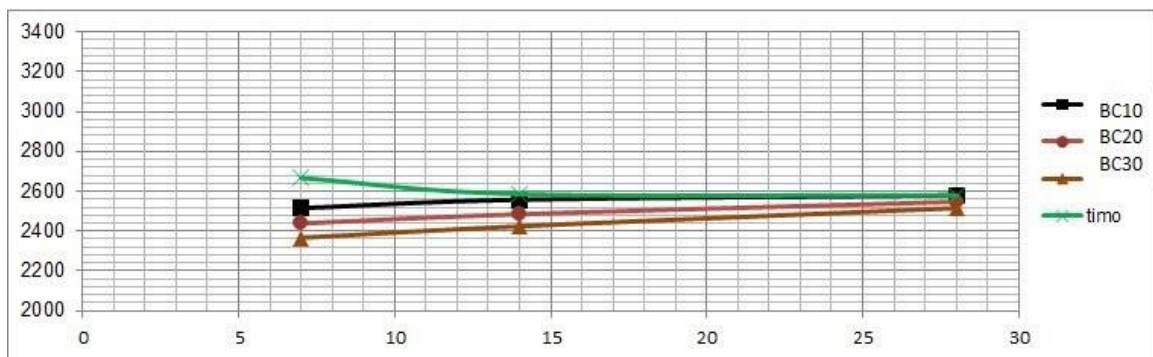


Figure IV.21: Courbe illustre les résultats concernant la vitesse de propagation en fonction des temps de Bc.

Toutes les courbes (BC10, BC20 et BC30) présentent une évolution croissante avec le temps, de 7 à 28 jours, contrairement à l'échantillon témoin « Témoin » qui commence avec une valeur élevée puis se stabilise.

On remarque un classement clair selon le taux de substitution : le mélange ayant le plus faible taux de remplacement BC10 donne les vitesses de propagation les plus élevées par rapport à BC20 et BC30.

Les vitesses enregistrées pour l'ensemble des échantillons varient globalement entre 2350 m/s et 2650 m/s.

Discussion

La supériorité initiale de l'échantillon témoin « Témoin » à 7 jours est liée à l'utilisation de granulats naturels caractérisés par une densité plus élevée et une porosité plus faible, ce qui facilite la propagation rapide des ondes ultrasoniques dès les premiers âges.

Pour les échantillons BC contenant des granulats de béton recyclé, la diminution de la vitesse par rapport au témoin s'explique par la présence d'ancien mortier adhérent aux granulats recyclés, connu pour sa forte porosité. Cette porosité agit comme des vides d'air qui dispersent les ondes ultrasoniques et ralentissent leur propagation.

À 28 jours, on observe un rapprochement important entre la courbe BC10 et celle du témoin, ce qui indique que les réactions chimiques tardives ont permis de combler progressivement les vides et de compenser le déficit initial de densité.

Interprétation scientifique

En physique, la vitesse du son dans les matériaux solides augmente avec la densité et le module d'élasticité. L'augmentation progressive de la vitesse dans les échantillons BC avec le temps s'explique donc par la transformation du matériau d'un milieu poreux et hétérogène vers une structure plus compacte grâce à la poursuite des réactions d'hydratation.

Selon la classification des essais non destructifs (NDT), les valeurs obtenues indiquent une qualité de mortier moyenne à bonne, ce qui montre que le remplacement des granulats naturels par jusqu'à 30 % de déchets de béton recyclé n'altère pas fortement la structure interne du mortier.

Déchets de béton (B)

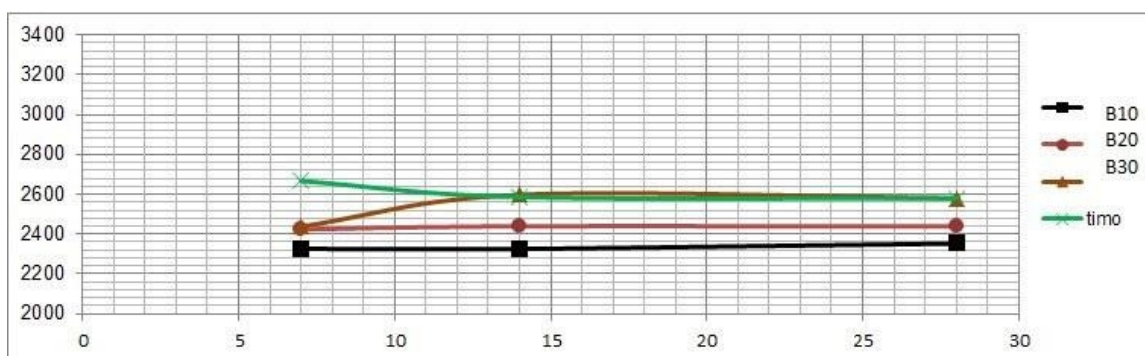


Figure IV.22: Courbe illustre les résultats concernant la vitesse de propagation en fonction des temps de B.

On remarque que :

L'axe horizontal représente l'âge des éprouvettes en jours (7, 14 et 28 jours).

L'axe vertical représente la vitesse de propagation des ultrasons en (m/s).

L'échantillon témoin « Témoin » apparaît en vert avec la vitesse initiale la plus élevée à 7 jours (environ 2650 m/s), puis la valeur diminue légèrement pour se stabiliser autour de 2580 m/s au 28^e jour.

Les échantillons de substitution B10, B20 et B30 présentent des vitesses inférieures à celles du témoin au jeune âge. On remarque que l'échantillon B30 montre une évolution importante, atteignant puis rejoignant la courbe du témoin à 14 jours avant de se stabiliser avec celle-ci à 28 jours.

Les échantillons B10 et B20 restent relativement stables avec des vitesses plus faibles, comprises entre 2300 \, m/s et 2450 \, m/s pendant toute la période d'essai.

Interprétation scientifique

La diminution de la vitesse dans les échantillons B par rapport au témoin « Témoin » à 7 jours est due à une porosité initiale plus élevée liée à la nature des granulats recyclés, ce qui provoque une dispersion des ondes ultrasoniques.

La forte augmentation de la courbe B30 traduit une évolution importante des réactions d'hydratation et un remplissage progressif des vides internes par les produits cimentaires, ce qui a permis d'augmenter la densité de l'échantillon jusqu'à atteindre des performances proches du témoin à la fin de l'essai.

L'augmentation ou la stabilité de la vitesse de propagation au-dessus de 2300 \, m/s constitue un indicateur physique d'une amélioration du module d'élasticité et de la rigidité mécanique du mortier.

Interprétation Générale

- Effet de la porosité : L'explication physique de la diminution de la vitesse dans les éprouvettes (Br, BC, B) réside dans le fait que les granulats recyclés contiennent des

pores internes et de l'air occlus. Étant donné que la vitesse du son dans l'air (340 m/s) est nettement inférieure à celle dans les milieux solides, ces pores agissent comme des « obstacles » qui entravent le cheminement de l'onde et augmentent son temps de propagation.

- **Dynamique d'hydratation** : L'ascension des courbes au fil du temps s'explique chimiquement par la croissance des cristaux de silicate de calcium hydraté (C-S-H). Ces derniers remplissent les vides intergranulaires et capillaires, transformant ainsi le milieu d'un état poreux et dispersif pour les ondes en un milieu plus compact et conducteur du son.
- **Phénomène de convergence** : La convergence des courbes à l'âge de 28 jours s'explique par le fait que le mortier à base de déchets de démolition possède une « capacité compensatrice ». En effet, les pores contribuent à absorber une partie de l'eau de gâchage pour la restituer ultérieurement, permettant ainsi la continuité des réactions d'hydratation. Cela améliore l'adhérence entre les granulats et la pâte de ciment au niveau de la zone de transition interfaciale (ITZ).

. Conclusion Générale

- **Viabilité structurelle** : Toutes les courbes se sont stabilisées au-dessus du seuil de 2300 m/s. Il s'agit d'une conclusion forte prouvant que l'utilisation de déchets de construction (briques, béton, etc.) à des taux atteignant 30% produit un mortier d'une qualité structurelle tout à fait acceptable, sans provoquer d'effondrement des propriétés du matériau.
- **Efficacité de la valorisation** : L'expérience démontre le succès du processus de « valorisation des déchets ». Le mortier vert (durable) présente une évolution globale qui rivalise avec celle du mortier traditionnel ou s'en rapproche à maturité (28 jours).

IV.3.5. Mesure de l'absorption par capillarité

Il s'agit d'une expérience physique visant à mesurer la capacité d'un matériau solide (tel que le béton, la brique ou le mortier) à aspirer des liquides (généralement l'eau) et à les transférer à travers ses pores fins sous l'effet des forces d'adhésion et de cohésion,

sans pression externe. Cette expérience est utilisée pour évaluer la durabilité des matériaux et leur perméabilité poreuse.

1. Déchet de béton (B et Bc)

FigureIV.23: Courbe illustre les résultats d'absorption capillaire en fonction des temps de B et Bc.

- La courbe B10 (en noir) affiche le taux d'absorption capillaire le plus faible par rapport au témoin (Timo) et aux autres échantillons, tandis que l'échantillon BC30 (en orange) enregistre l'absorption la plus élevée.
- La courbe représente la relation entre la quantité d'absorption et le temps en minutes pour plusieurs échantillons différents (Bc, B...).
- On observe une montée brusque de toutes les courbes au cours des 120 premières minutes, indiquant une absorption initiale très rapide.
- Après environ 480 minutes, les courbes commencent à stagner (plateau), où la vitesse d'absorption diminue progressivement avec la saturation des gros pores.
- L'échantillon BC30 présente le taux d'absorption le plus élevé, tandis que l'échantillon Timo (en rouge foncé) montre une stabilité plus rapide et des taux d'absorption relativement plus faibles dans les phases avancées.
- La capacité d'absorption totale et sa vitesse varient selon la composition de l'échantillon. Certaines courbes (comme B30) ont continué à augmenter légèrement jusqu'à la fin de l'expérience (1440 minutes), tandis que d'autres ont atteint un état de quasi-saturation.

L'écart entre les courbes est dû à :

La réduction de l'absorption dans l'échantillon B10 est due au rôle du faible pourcentage d'ajout dans le colmatage des pores microscopiques et la réduction de la porosité capillaire, alors que l'augmentation des proportions (notamment dans la catégorie BC) entraîne un accroissement du volume des pores connectés au sein du

mortier, facilitant ainsi la pénétration de l'eau.

La structure poreuse de chaque échantillon. Les échantillons ayant enregistré des valeurs élevées (BC30) possèdent des pores capillaires plus ouverts ou interconnectés, facilitant la pénétration de l'eau. En revanche, les échantillons moins absorbants se caractérisent par une structure plus dense ou des pores fermés.

2. Selon la loi de "Sorptivité" (Sorptivity)

1. Tension superficielle : Les forces d'attraction entre les molécules d'eau et la surface des pores internes du matériau tirent le liquide vers le haut.

2. Gradient poreux : Plus les pores sont petits et interconnectés, plus la force d'ascension capillaire est élevée ; cependant, si le matériau est trop dense, la perméabilité diminue.

3. Relation temporelle : L'absorption est directement proportionnelle à la racine carrée du temps ($S = \sqrt{t}$), ce qui explique pourquoi la courbe est raide au début puis commence à s'infléchir.

Déchet de brique (BrC etBr)

FigureIV.24: Courbe illustre les résultats d'absorption capillaire en fonction des temps de Br et BrC.

- L'analyse du graphique montre que les échantillons contenant un taux de substitution de 10%, plus précisément les courbes noire (Br10) et violette (BrC10), présentent les meilleures performances par rapport au témoin (Timo), avec les valeurs d'absorption d'eau les plus faibles.
- Les courbes montrent une montée initiale abrupte, prouvant que les pores capillaires de tailles grande et moyenne dans les Déchet de brique se remplissent d'eau à grande vitesse dès le contact.
- Ensuite, le taux d'absorption diminue et la courbe devient quasi horizontale, indiquant que la majorité des vides poreux sont saturés et que le processus dépend désormais de la diffusion de l'eau dans les pores très fins.

L'analyse des résultats montre que :

- Ceci s'explique par le fait que l'incorporation de ces faibles pourcentages a contribué au colmatage des pores capillaires internes du mortier (effet de remplissage ou "filler effect"), améliorant ainsi la compacité de la structure et réduisant sa perméabilité. À l'inverse, on observe que l'augmentation du taux de remplacement à 30% (courbes verte et orange) produit l'effet opposé en dépassant les valeurs du témoin, ce qui indique une augmentation de la porosité totale et une diminution de la densité du matériau à ces dosages élevés.
- L'ajout de Déchet de brique à des concentrations élevées augmente le nombre de pores capillaires ouverts. À l'inverse, le témoin Timo et l'échantillon Br10 ont montré une montée plus modérée, signe d'une structure poreuse plus fermée au départ.
- L'augmentation du taux de substitution des agrégats ou du ciment par des Déchet de brique accroît progressivement la porosité du matériau final, rendant les échantillons à 30% les plus vulnérables à la pénétration de l'humidité.
- Le traitement a modifié la distribution granulométrique des pores, renforçant la capacité d'absorption capillaire continue sur de longues périodes.
- L'échantillon Br10 a présenté la meilleure performance structurelle (plus faible absorption), le rendant plus résistant aux conditions environnementales. L'échantillon BrC30 a continué de croître jusqu'à la fin du temps imparti sans atteindre une stabilité absolue, indiquant une capacité d'absorption supérieure non saturée après 24 heures.

. Conclusions

L'incorporation de poudre de brique et de béton recyclé augmente la perméabilité du mortier par rapport à l'échantillon de référence, particulièrement au taux de substitution de 30%.

Toutes les échantillons passent par une phase d'absorption rapide durant les premières heures avant de se stabiliser sur une trajectoire quasi linéaire. Les taux de substitution faibles (10% et 20%) offrent des résultats proches du mélange conventionnel, ce qui soutient la possibilité de valoriser ces déchets sans nuire aux propriétés du matériau.

. Synthèse générale

L'absorption capillaire est un indicateur essentiel pour juger la qualité des matériaux de construction. Les courbes démontrent que les échantillons étudiés possèdent des caractéristiques d'absorption variables : certains nécessitent un traitement pour réduire leur perméabilité, tandis que d'autres affichent un excellent comportement limitant l'infiltration des liquides, garantissant ainsi une meilleure durabilité en milieux humides.

Conclusion générale

Conclusion générale

Cette étude a permis d'analyser le comportement et la durabilité du mortier à l'état frais et à l'état durci, après substitution partielle du ciment ou du sable par différents pourcentages de déchets de briques et de déchets de béton. L'objectif principal était d'évaluer la possibilité de recycler ces matériaux dans la production d'un mortier écologique et performant sur le plan mécanique.

Les résultats ont montré que l'utilisation de ces déchets entraîne des modifications notables des propriétés physiques et mécaniques du mortier. On a observé soit une amélioration, soit une diminution des performances selon le taux de substitution et la nature du matériau utilisé.

Recommandations

Il est nécessaire de déterminer un taux de substitution optimal, ne dépassant généralement pas 10 % à 15 %.

Améliorer le traitement des déchets de briques et de béton (lavage, broyage, granulométrie).

Utiliser des ajouts minéraux ou chimiques (tels que les plastifiants ou les cendres volantes) afin d'améliorer la cohésion.

Contrôler rigoureusement le rapport eau/ciment (E/C).

Mener des études plus approfondies sur la durabilité à long terme, notamment la résistance à l'abrasion, au gel et au dégel.

Étudier l'effet de ces matériaux sur le retrait et la fissuration dans le temps.

Comparer l'influence des déchets de briques et de béton avec d'autres matériaux recyclés.

Développer des modèles mathématiques pour prédire le comportement du mortier contenant des matériaux recyclés.

Encourager l'utilisation industrielle de ces déchets afin de réduire la pollution environnementale et la consommation des ressources naturelles.

Liste de référence

1 KHELOUFI A., "Valorisation des déchets de briques concassées comme ajout finement divisé dans les mortiers", Revue des Énergies Renouvelables, 2010

2 بشنب زكرياء و صخر محمد بهاء الدين دراسة متانة الملاط المحتوي على الكثبان الرملية كبديل جزئي لرمال المحاجر (مذكرة تخرج) ماستر جامعة قاصدي مرباح ورقلة دفعة 2022-2023
3 عرار نسرين و كاتب منى ربحان المساهمة في الدراسة الفيزيائية الميكانيكية للملاط المقوى بشرائط القماش (من مخلفات الصناعية) (أطروحة ماستر) جامعة قاصدي مرباح ورقلة كلية العلوم التطبيقية 2022_2023

4 Labidi Abdelaziz, Soualah Bedadi Younes, Guediri Azzeddine
،Mamanou Abdelali Etude expérimentale sur le béton auto-plaçant avec des ajouts (déchet de construction) Promotion juin 2024

5 BOUBEKEUR, Cours de Matériaux de Construction 01 licence Génie CIVIL, Centre universitaire de Tissemsilt. 2017.

6 نصري أيوب و بورقعة طارق و عطالله السعيد : تأثير دمج رمل الكثبان المسحوقة على خصائص الملاط أطروحة ماستر جامعة الشهيد حمه لخضر الوادي كلية العلوم والتكنولوجيا دفعة 2021-2020

7 AFNOR. (1988). Béton - Mesure du temps d'écoulement des bétons et des mortiers aux remanieurs (Ouvrabilité) (NF P 18-452). Association Française de Normalisation

8 نعيطي زهور ، زياد مسعودي، قوبي سامية دراسة تأثير نسبة E/C على متانة الملاط المعرض لبيئة عدوانية 2023_2024

9 NF P 15-437 : Ciments - Essais de maniabilité - Mesure du temps d'écoulement.

10 BELFERRAG Allaoua .(Thèse de doctorat) Contribution à l'amélioration des propriétés mécaniques et rhéologiques des bétons de sable de dunes 23/5/2016 université Mohamed khider-Biskra

11 NF EN 197-1 avril 2012 Ciment - Partie 1: composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants

12 BELFERRAG Allaoua. Valorisation des fibres métalliques issues des déchets pneumatiques dans les bétons de sable de dunes 20/06/2006 université Kasdi Merbah de Ouargla

13 NF EN 12390-4 novembre 2010 Essais pour béton durci Partie 4: résistance à la compression - Caractéristiques des machines d'essai

14 NEVILL EA.M propriétés des béton

15 NF EN 12504-4 juillet 2021 Essais pour béton dans les structures - Partie 4: détermination de la vitesse de propagation des ultsons

Chapitre -3- "Essais non destructifs du béton" (page 56 page 49) **16**

MEHTA, P. K., MONTEIRO P. J. M. Concrete: Microstructure, Properties, and Materials. 4th Edition, McGraw-Hill, 2014. **17**

BAI, L., et al. Research on the Preparation of Red Mud High-Performance Cement Mortar. MDPI, 2021. **18**

19 CHAALAL O: "Contribution à l'étude de durabilité des tiges en fibres de verre comme armature à béton", Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées (LCPC) N°199, Sept-Oct. 1995.

20 ماني محمد : المساهمة في تحسين خصائص خرسانة رمل الكثبان بواسطة التصحيح الحبيبي التعزيز بالألياف لمعدنية (أطروحة دكتورا) جامعة قاصدي مرباح ورقلة كلية العلوم التطبيقية و

2019

**21 NF EN 196-1 Norme français Détermination de résistances
mécanique 1995-indice de classement p15-471**

22 CIM BETON, <Collection technique Ciment et betons> Conception et
realisation: Am principe paris.Edition 2005.

23 NBN, Méthodes d'essai des mortiers pour maçonnerie - Partie 3 :
Détermination de la consistancedu mortier frais (à la table à secousses),NBN
EN 1015-3, 2000

AFNOR. (1994). Méthodes d'essaisdes ciments - Détermination du retrait **24**
et du gonflement (NF P15-433). Paris: Association Française de Normalisation.

25 BARON J., OLLIVIER J.P., "Les Bétons : Baseset données pour leur
formulation", Edition Eyrolles, 1996Paris.

26 بن موسى مصطفى وشفاح السعيد و رزيق السعيد : الدراسة التجريبية لمختلف أنواع البناء
المنطقة الوادي باستعمال الملاط (أطروحة ماستر) جامعة الشهيد حمه لخضر الوادي كلية
التكنولوجيا دفعة 2019-2020

27 Wiki<[https://ar. Wikipedia.org](https://ar.wikipedia.org).

28 NFP94-64(Novembre 93) Norme Française. Détermination de la Masse
Volumique absolue apparente.

29 NF P 18-555 décembre 1990

Granulats - Mesures des masses volumiques, coefficient d'absorption et
teneur en eau des sables.

30 NF P 18-554 décembre 1990

Granulats - Mesures des masses volumiques, de la porosité, du coefficient
d'absorption et de la teneur en eau des gravillons et cailloux.

31 NF P 18-598 Octobre 1991 Norme Française Equivalent de sable

32 NF P18-598octobre 1991

Granulats - Équivalent de sable

33 NF EN 933-2 juillet 2020 Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats Partie 2:détermination de la granularité - Tamis de contrôle, dimensions nominales des ouvertures

34 NFP 18-560 Norme française, Analyse granulométrique.

35 مريقة ابراهيم و رحمانى كمال المساهمة في تحسين خصائص خرسانة رمل المحاجر بواسطة التصحيح الحبيبي (مذكرة ماستر) الوادي جامعة الشهيد حمه لخضر كلية العلوم والتكنولوجيا . 2019

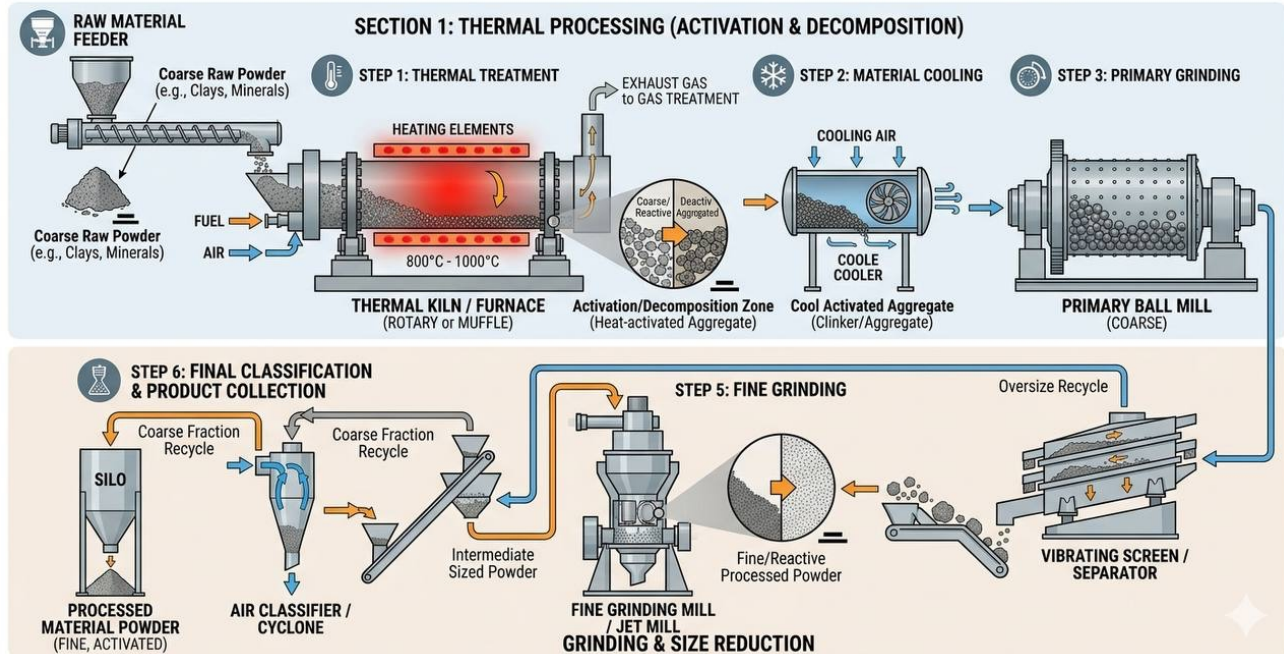
NA 442 Date: 2005 N° édition : 3 Norme algérienne. Ciment composition , **36** spécification et critères de conformité des ciments

Courants

37 A. Chikh , "Formulation et caractérisation d'un béton auto-plaçant ", Thèse d'Ingénieur d'Etat en Génie Civil, Ecole Nationale de Poly Technique Alger, 2005/2006, (Pages/Page44/Page 72/ page74).

Annexes

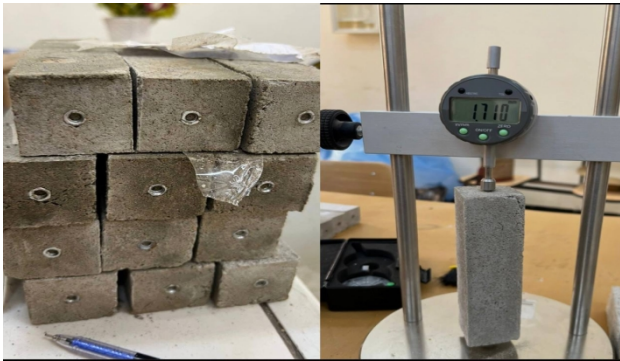
INTEGRATED FLOWCHART: THERMAL ACTIVATION & GRINDING OF RAW POWDER



Images illustratives pour la mesure de la résistance à la compression.



Images illustratives pour la mesure de la résistance à la flexion



Images illustratives pour la mesure
de la force de retrait.



Images illustratives pour la mesure.
de la vitesse du son



Images illustratives pour la mesure
de l'absorption



Images illustratives pour mesurer la force
de l'équivalent



Images illustratives du processus de mélange