



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique



Université de Hamma Lakhder El Oued

Faculté de la Technologie

Département de hydrolyque et génie civil

Mémoire

En vue de l'obtention du diplôme de Master

Filière : Genie civil

Option : Matreieu in genie civil

**Contribution à l'amélioration des caracteristiques physico-
mécanique sur le mortie à base de poudre de (verre, Marbre)**

Présenté par :

REHOUMA Oujidane

BEN AMMAR Jouhaina

Supervisé par :

Dr. BEDADI LAID

Devant le jury composé de :

-Dr : Mani mohamed

Président

- Dr : Djedid Tarek

Examineur

- Dr : gherbi laid

Représentant de l'incubateur

-Représentant d'une entreprise économique

Anner univercitaire : 2025/2026

شكر وتقدير

الحمد لله الذي أنار لنا درب العلم، ووفقنا لإتمام هذا العمل المتواضع، راجين أن

يكون ذا فائدة علمية وقيمة نافعة، وأن يلقي القبول والتقدير

نتقدم بأسمى عبارات الشكر والتقدير والامتنان إلى الأستاذ الفاضل بدادي العيد

الذي لم يبخل علينا بتوجيهاته القيّمة ونصائحه السديدة، وكان خير مرشدٍ وداعم

طوال مراحل إنجاز هذا البحث، فله منا خالص الاحترام والتقدير

كما نتوجه بجزيل الشكر إلى كافة أساتذة قسم الري والهندسة المدنية بجامعة

الشهيد حمه لخضر بالوادي الذين ساهموا بعلمهم وتوجيهاتهم في تكويننا العلمي

فكان لهم الأثر الطيب في مسيرتنا الدراسية

ولا يفوتنا أن نتقدم بالشكر الجزيل إلى موظفي، مخبر الهندسة المدنية و الهيو

التكنولوجي على تعاونهم الدائم ومساعدتهم القيّمة، وكل من مدّ لنا يد العون من

قريب أو بعيد وساهم في إنجاز هذا العمل

كما نعبر عن خالص امتناننا لأعضاء لجنة المناقشة الموقّرين، لتفضلهم بقراءة هذا

العمل وتقييمه، وما سيبدونه من ملاحظات وتوجيهات قيّمة ستثري هذا البحث وتزيده

جودة وفائدة

وفي الأخير، نسأل الله أن يجعل هذا العمل خالصاً لوجهه الكريم، وأن يكون لبنة

نافعة في سبيل العلم والمعرفة.

إهداء

إلى من كان وجودهم النعمة الأولى في حياتي

إلى سندي ومسندي في كل خطوة...

إلى أُمي وأبي الغاليين..

لكم كل الحب والامتنان، لفضل دعمكما وتضحياتكما أنا هنا اليوم

إلى اختاي و أخي..

أنتم قوتي وظهري، ورفقة العمر الجميلة

وإلى جدي العزيز حفظه الله..

كنتَ دائماً مصدر دُعمي وتشجيعي، ووجودك إلى جانبي كان دافعاً لي لمواصلة الطريق

وتحقيق هذا الإنجاز، فلك مني كل التقدير والمحبة

رحومه وجدان

إهداء

إلى أبي الغالي...

ذلك السند الذي كان الأمان والقوة في كل خطوة

أهديك هذا النجاح الذي ما كان ليكتمل لولا تعبك ودعواتك الصادقة

إلى أُمي الحبيبة...

يا مصدر الحنان والدعم

إليك أهدي ثمرة سنواتٍ من التعب والسهرة

فكل ما وصلت إليه كان بفضلك بعد الله

أسأل الله أن أكون ابنة ترفع رأسك فخراً، وقدوةً صالحة لإخوتي

وإلى روح جدتي الغالية رحمها الله...

رحلت وبقي أثرك ودعاؤك في قلبي

.رحمك الله رحمة واسعة وجعل مقامك الجنة

إلى إخوتي...

أنتم أجمل سند ورفقة

أتمنى لكم نجاحاً وتوفيقاً يفوق كل الأمنيات

بن عمار جهينة

Résumé :

Cette étude expérimentale examine l'effet de la substitution partielle du ciment par de la poudre de verre et de la poudre de marbre extraites des déchets de matériaux de construction, à des taux de 10%, 20% et 30%, en utilisant des poudres traitées et non traitées thermiquement à 500 °C, sur les propriétés physiques et mécaniques du mortier. Les résultats ont montré que les faibles taux de substitution, notamment 10% et 20%, ont contribué à améliorer les performances du mortier, en particulier pour les mélanges traités thermiquement. Le mélange à base de poudre de verre traitée à 10% a atteint la meilleure résistance à la compression et la vitesse de propagation des ondes ultrasoniques la plus élevée, reflétant une amélioration de la densité interne et une réduction de la porosité, tandis que le mélange à base de poudre de verre non traitée à 10% a enregistré la meilleure résistance à la flexion. Les mélanges à base de poudre de marbre traitée à 30% et à 20% ont présenté les valeurs de retrait les plus faibles, tandis que les mélanges à faibles taux de substitution, poudre de verre traitée à 10% et poudre de marbre traitée à 10%, ont montré un comportement d'absorption capillaire proche de celui du mélange de référence par rapport aux mélanges à taux élevés. Ces résultats confirment la possibilité d'utiliser la poudre de verre et la poudre de marbre comme substituts partiels efficaces du ciment dans le mortier, contribuant ainsi à la valorisation des déchets industriels et à la réduction de leurs impacts environnementaux, et ouvrant des perspectives prometteuses vers le développement de matériaux de construction plus durables et respectueux de l'environnement.

Motsclés:

Mortier, poudre de verre, poudre de marbre, traitement thermique, résistance à la compression, résistance à la flexion, retrait, ultrasons, absorption d'eau par capillarité.

Abstract:

This experimental study examines the effect of partially substituting cement with glass powder and marble powder extracted from construction material waste, at rates of 10%, 20%, and 30%, using both thermally treated and untreated powders at 500 °C, on the physical and mechanical properties of mortar. The results showed that low substitution rates, particularly 10% and 20%, contributed to improving mortar performance, especially for thermally treated mixtures. The mixture containing 10% treated glass powder achieved the best compressive strength and the highest ultrasonic wave propagation velocity, reflecting an improvement in internal density and a reduction in porosity, while the mixture containing 10% untreated glass powder recorded the best flexural strength. The mixtures containing 30% and 20% treated marble powder showed the lowest shrinkage values, while the mixtures with low substitution rates, 10% treated glass powder and 10% treated marble powder, exhibited capillary absorption behavior closer to that of the reference mixture compared to the high-rate mixtures. These results confirm the feasibility of using glass powder and marble powder as effective partial substitutes for cement in mortar, thereby contributing to the valorization of industrial waste and the reduction of their environmental impacts, and opening promising prospects toward the development of more sustainable and environmentally friendly construction materials.

Keywords:

Mortar, glass powder, marble powder, thermal treatment, compressive strength, flexural strength, shrinkage, ultrasonic pulse velocity, capillary water absorption.

الملخص:

تتناول هذه الدراسة التجريبية تأثير التعويض الجزئي للإسمنت بمسحوق الزجاج ومسحوق الرخام المستخلصين من نفايات مواد البناء، بنسب 10% و20% و30%، مع استخدام مساحيق معالجة وغير معالجة حرارياً عند 500 °م، على الخصائص الفيزيائية والميكانيكية للملاط. أظهرت النتائج أن نسب التعويض المنخفضة، لا سيما 10% و20%، أسهمت في تحسين أداء الملاط، خاصةً للخلطات المعالجة حرارياً، إذ حققت خلطة مسحوق الزجاج المعالج بنسبة 10% أفضل مقاومة ضغط وأعلى سرعة لانتشار الموجات فوق الصوتية مما يعكس تحسناً في الكثافة الداخلية وانخفاضاً في المسامية، في حين سجلت خلطة مسحوق الزجاج غير المعالج بنسبة 10% أفضل مقاومة للانحناء. كما أظهرت خلطتنا مسحوق الرخام المعالج بنسبة 30% ومسحوق الرخام المعالج بنسبة 20% أدنى قيم للانكماش، بينما أبدت الخلطات ذات نسب التعويض المنخفضة مسحوق الزجاج المعالج بنسبة 10% ومسحوق الرخام المعالج بنسبة 10% سلوكاً في الامتصاص الشعري أقرب إلى الخلطة المرجعية مقارنةً بالخلطات ذات النسب المرتفعة. تؤكد هذه النتائج إمكانية توظيف مسحوق الزجاج ومسحوق الرخام كبديل جزئية فعالة للإسمنت في الملاط، مما يسهم في تثمين النفايات الصناعية والحد من أثارها البيئية، ويفتح آفاقاً واعدة نحو تطوير مواد بناء أكثر استدامةً وصداقةً للبيئة.

الكلمات المفتاحية:

الملاط، مسحوق الزجاج، مسحوق الرخام، المعالجة الحرارية، مقاومة الضغط، مقاومة الانحناء، الانكماش، الموجات فوق الصوتية، الامتصاص الشعري للماء.

Liste des Figures

Figure I-1 : Composants du mélange de mortier	5
Figure I-2Ciment Portland	8
Figure I-3 : Signification de l'abréviation du ciment	8
Figure I-4Utilisations du mortier [10]	12
Figure I-5 Consistance du mortier sur la table à secousses	14
Figure I-6 Principe de fonctionnement du maniabilimètre	15
Figure I-7 Moule pour moulage des éprouvettes de mortier [11]	15
Figure I-8 Dispositif pour l'essai de résistance à la flexion. [11]	16
Figure I-9 Dispositif de rupture en compression. [11]	16
Figure I-10 Résistance du mortier normal [11]	16
Figure I-11 Appareillage pour la mesure du retrait [11]	17
Figure I-12: Essai d'absorption d'eau par capillarité [14]	18
Figure I-13 illustrant les différentes configurations de l'émetteur et du récepteur[14]	19
Figure I-14Types de déchets solides [18]	21
Figure I-16 Constituants chimique du verre [21]	24
Figure I-17Poudre de verre	25
Figure I-18 Poudre de marbre	28
FigureII-1 : Dosages des constituants utilisés dans le mélange	34
Figure II-2 : Présentation de la table à chocs (Table d'étalement) et mesure de l'ouvrabilité. 35	
Figure II-3 Constituants du mélange témoin	37
Figure II-4 Mélange avec 10% de poudre de marbre	37
Figure II-5 Mélange avec 20% de poudre de marbre	38
Figure II-6 Mélange avec 30% de poudre de marbre	38
Figure II-7 Processus de malaxage	38
Figure II-8 Phase de moulage et compactage	39
Figure II-9 Éprouvettes prismatiques après démoulage	39
Figure II-10 Éprouvettes prismatiques lors de l'essai de retrait	41
Figure II-11 Essai de mesure de la vitesse des ultrasons	41
Figure II-12 Immersion partielle des éprouvettes dans le bac d'eau pour l'essai d'absorption capillaire	43
Figure II-13 Éprouvette prismatique placée sur la machine d'essai de flexion	44
Figure II-14 Réalisation de l'essai de résistance à la compression sur une demi-éprouvette ..	45
Figure III-1 Éprouvette graduée pour l'essai d'équivalent de sable.	50

Figure III-2 Essai de l'équivalent de sable	50
Figure III-3 Machine agitatrice	50
Figure III-4 Essai de Masse volumique absolue	52
Figure III-5 Essai de Masse volumique absolue	53
Figure III-6 Essai de la Masse volumique apparente du sable	54
Figure III-7 Essai de Masse volumique apparente de verre	55
Figure III-8 Essai de Masse volumique apparente de marbre	55
Figure III-9 Série de tamis utilisée	57
Figure III-10 Essai d'analyse granulométrique	58
Figure III-11 Courbe granulométrique	59
Figure III-12 illustre les résultats du module de finesse	62
Figure III-13 Diagramme d'analyse de (DRX) sur poudre de verre	63
Tableau III-6 Composition chimique du déchet de verre broyé[27]	63
Figure III-14 Diagramme d'analyse de (DRX) sur poudre de marbre	64
Figure IV-1 Évolution du retrait des mortiers contenant de la poudre de verre en fonction du temps.	69
Figure IV-2 Évolution du retrait des mortiers contenant de la poudre de marbre en fonction du temps	70
Figure IV-3 Comparaison des valeurs du retrait des différents mélanges à 28 jours.	71
Figure IV-4 Évolution de l'absorption capillaire d'eau des mortiers contenant de la poudre de verre en fonction du temps.	73
Figure IV-5 · Évolution de l'absorption capillaire des mélanges contenant de la poudre de verre en fonction de la racine carrée du temps ·	74
Figure IV-6 Évolution de l'absorption capillaire d'eau des mortiers contenant de la poudre de marbre en fonction du temps.	75
Figure IV-7 Évolution de l'absorption capillaire des mélanges contenant de la poudre de marbre en fonction de la racine carrée du temps ·	76
Figure IV-8 Comparaison de l'absorption capillaire des différents mélanges après immersion.	77
Figure IV-9 Comparaison de l'absorption capillaire des différents mélanges en fonction de la racine carrée du temps.	78
Figure IV-7 Évolution de la vitesse de propagation des ultrasons des mortiers contenant de la poudre de verre en fonction du temps.	80

Figure IV-8 Évolution de la vitesse de propagation des ultrasons des mortiers contenant de la poudre de marbre en fonction du temps	81
Figure IV-9 Comparaison de la vitesse de propagation des ultrasons des différents mélanges à 28 jours.	83
Figure IV-10 Évolution de la résistance à la flexion des mortiers contenant de la poudre de verre en fonction du temps.	85
Figure IV-11 Évolution de la résistance à la flexion des mortiers contenant de la poudre de marbre en fonction du temps.	86
Figure IV-12 Comparaison de la résistance à la flexion des différents mélanges à 60 jours. ..	87
Figure IV-13 Évolution de la résistance à la compression des mortiers contenant de la poudre de verre en fonction du temps	89
Figure IV-14 Évolution de la résistance à la compression des mortiers contenant de la poudre de marbre en fonction du temps.	91
Figure IV-15 Comparaison de la résistance à la compression des différents mélanges à 60 jours.	92

Liste des tableaux

Tableau I- 1 Type des mortiers selon le dosage des liants. [11].....	13
Tableau I-2 Type des mortiers selon le dosage des liants.	14
Tableau I-3 Classe de consistance des bétons	15
Tableau I-4 Classification de la qualité du mortier en fonction de la vitesse de propagation des ultrasons	19
Tableau I-5 Taux de production des déchets solides dans certains pays du monde [17]	20
Tableau II-1 Composition du mortier par mètre cube (1 m3).....	34
Tableau II-2 Résultats de l'essai d'étalement et composition des mélanges	36
Tableau II-3 Taux de substitution du ciment par les poudres utilisées et désignation des mélanges	36
Tableau III-1 des domaines d'utilisation	51
Tableau III-2 le Résultats	56
Tableau III-3 des résultats de l'analyse granulométrique	59
Tableau III-4 illustre les résultats du module de finesse	60
Tableau III-7 Composition chimique du déchet de marbre broyé[27]	64

Sommaire

شكر وتقدير	
إهداء	
Résumé :	
Liste des Figures	
Liste des tableaux	
Sommaire	
Introduction générale	1

Chapitre I : Etude bibliographique

I.1. Introduction	4
I.2. Le mortier	4
I.2.1. Définition du mortier :	4
I.2.2. Constituants de base du mortier :	5
I.2.3. Types de mortiers :	10
I.2.4. Utilisations du mortier :	11
I.2.5. Dosage des mortiers :	13
I.2.6. Propriétés du mortier à l'état frais et à l'état durci :	13
I.2.6.1. Propriétés du mortier à l'état frais :	13
I.3. Valorisation des déchets en génie civil :	19
I.3.1. Aperçu historique du recyclage des déchets :	20
I.3.2. Définition des déchets solides :	20
I.3.3. Types de déchets solides :	21
I.3.5. Impacts environnementaux de l'industrie cimentière:	22
I.4. Le verre :	23
I.4.1. Définition du verre :	23
I.4.2. Sources :	24
I.4.3. Étapes de recyclage des déchets de verre :	24
I.4.4. Poudre de verre :	25
I.4.5. Propriétés de la poudre de verre :	25
I.4.6. Valorisation de la poudre de déchets de verre dans le domaine des matériaux de construction :	26
I.4.7. Activité pouzzolanique de la poudre de verre	26
I.5. Le Marbre :	27

I.5.1. Définition du marbre :	27
I.5.2. Sources :	27
I.5.3. Étapes de recyclage des déchets de marbre :	27
I.5.4. Poudre de marbre :	28
I.5.5. Propriétés de la poudre de marbre :	29
I.5.6. Valorisation de la poudre de déchets de marbre dans le domaine des matériaux de construction :	29
I.5.7. Effet physique de la poudre de marbre	29
I.6. Conclusion	31

Chapitr II : Méthodologie de Formulation et Essais Expérimentaux

III.1. Introduction :	33
III.2. Préparation du mortier :	33
III.2.1. Procédure de malaxage du mortier :	33
III.3. Essai de maniabilité (Essai d'étalement)	35
III.3.1. Essai d'étalement selon la norme NBN EN 1015-3 :	35
III.3.2. Principe de l'expérience :	35
III.3.3. Description de l'appareil :	35
III.4. Confection et moulage des éprouvettes :	36
III.4.1. Étapes de préparation :	37
III.4.2. Présentation du milieu de conservation (milieu aérien):	39
III.5. Méthodes d'essais sur les éprouvettes	40
III.5.1. Les essais non destructifs	40
III.5.2. Les essais destructifs	44
III.6. Conclusion	46

Chapitre III :Caractéristiques des Matériaux Utilisés

II.1. Introduction	48
II.2. Matériaux utilisés dans l'étude	48
II.2.1. Le Sable	48
II.2.1.1. L'Équivalent de Sable	49
II.2.1.1.c.b. Poudre de marbre :	55
II.2.2. L'eau :	60
II.2.3. Le Ciment :	61
II.3. Traitement thermique des poudres d'ajouts (Verre et Marbre)	62
II.3.1. Poudre de Verre (PV) : Caractérisation physico-chimique et minéralogique	62

II.3.2. Poudre de Marbre (PM) : Caractérisation physico-chimique et minéralogique	64
II.4. Conclusion	65

Chapitre IV : Analyse et discussion des résultats

IV.1. Introduction	67
IV.2. Comportement du mortier à l'état frais :	67
IV.2.1. Résultats de la maniabilité (étalement)	67
IV.3. Comportement du mortier à l'état durci :	68
IV.3.1. Essai de mesure du retrait :	68
IV.3.2. Essai d'absorption d'eau par capillarité :	72
IV.3.3. Essai de vitesse de propagation des ultrasons :	79
IV.3.4. Essai de résistance à la flexion :	84
IV.3.5. Essai de résistance à la compression :	88
Conclusion générale	94
Références bibliographiques	96
Annexes	Error! Bookmark not defined.

Introduction générale

Introduction générale

Le mortier est l'un des matériaux de construction les plus utilisés dans le domaine du génie civil, où il trouve ses applications dans les travaux d'enduit, de maçonnerie et d'assemblage des éléments de construction. Sa qualité est étroitement liée à ses constituants de base, à savoir le ciment, le sable et l'eau, auxquels s'ajoutent diverses additions visant à améliorer ses performances et à optimiser ses propriétés.

Dans un contexte marqué par l'expansion rapide du secteur de la construction et la hausse considérable de la demande en ciment, les émissions de dioxyde de carbone issues de cette industrie n'ont cessé d'augmenter. Parallèlement, le problème des déchets industriels, notamment les déchets de verre et de marbre, s'est aggravé au point de constituer un fardeau environnemental et sanitaire qu'on ne peut ignorer. Face à cette réalité, l'intégration de ces sous-produits dans la fabrication des matériaux de construction s'avère une piste sérieuse, d'autant que la poudre de verre possède une activité pouzzolanique qui renforce certaines propriétés mécaniques du mortier, tandis que la poudre de marbre joue le rôle d'un filler réduisant la porosité et améliorant la compacité.

La présente étude, intitulée « Contribution à l'amélioration des caractéristiques physico-mécaniques du mortier à base de poudre de verre et de marbre », vise à évaluer l'effet de la substitution partielle du ciment par ces deux poudres, traitées et non traitées thermiquement, sur les propriétés physiques et mécaniques du mortier.

Afin d'atteindre cet objectif, ce mémoire est structuré en quatre chapitres. Le premier présente une synthèse bibliographique sur le mortier, ses constituants et la valorisation des déchets de verre et de marbre dans les matériaux de construction. Le deuxième décrit le programme expérimental adopté, les formulations étudiées et les méthodes d'essai utilisées. Le troisième est consacré à la présentation des matériaux employés ainsi qu'à leurs propriétés physiques et chimiques. Enfin, le quatrième chapitre est dédié à l'analyse et à la discussion des résultats obtenus, en vue de déterminer les taux de substitution optimaux.

Enfin, on terminera par une conclusion générale suivie des recommandations et perspectives.

***Chapitre I : Etude
bibliographique***

I.1. Introduction

Le mortier représente l'une des plus anciennes innovations techniques connues par l'humanité, ayant accompagné l'évolution des civilisations depuis l'Antiquité. Ses racines remontent au dixième millénaire avant J.-C., lorsque les premières civilisations de Mésopotamie utilisaient le « mortier d'argile » pour lier les unités de construction. Avec le besoin croissant de structures plus durables, les Grecs et les Romains ont révolutionné ce domaine en découvrant le « mortier hydraulique » à base de cendres volcaniques (pouzzolane), ce qui a permis l'édification d'ouvrages ayant résisté des millénaires, à l'instar du Panthéon à Rome.[1]

Avec l'avènement de la révolution industrielle au XIXe siècle, le mortier est passé à sa phase contemporaine grâce à l'invention du ciment Portland, devenu le liant le plus utilisé en raison de sa haute résistance et de sa rapidité de durcissement. Cependant, cette supériorité technique du ciment se heurte aujourd'hui à des défis environnementaux majeurs, sa production contribuant directement à l'aggravation du réchauffement climatique par d'importantes émissions de dioxyde de carbone (CO₂).

Face à ces enjeux, une orientation moderne émerge vers le « mortier durable », qui repose sur la valorisation des déchets industriels et la réduction de l'empreinte carbone des matériaux de construction. Cette étude s'inscrit dans cette optique pour mettre en lumière la possibilité d'intégrer les poudres de verre et de marbre comme substituts partiels au ciment, afin d'établir un équilibre entre la préservation des propriétés mécaniques du mortier et les exigences environnementales pressantes. [1]

I.2. Le mortier

I.2.1. Définition du mortier :

Le mortier est considéré comme l'un des matériaux de construction les plus anciens. Il est composé essentiellement d'un liant et d'un granulat fin. Il s'agit généralement d'un mélange de sable avec du ciment ou de la chaux et de l'eau. Le mortier est utilisé pour lier les unités de maçonnerie, telles que les briques et les pierres, ainsi que pour remplir les joints entre elles. Le mortier passe d'un état pâteux à un état solide après durcissement, ce qui lui confère la capacité d'assurer la cohésion et la stabilité des éléments structurels. [2]

I.2.2. Constituants de base du mortier :

- Le mortier se compose généralement des éléments suivants :
- Les matériaux inertes.
- L'eau
- Les liants (Matières liantes)

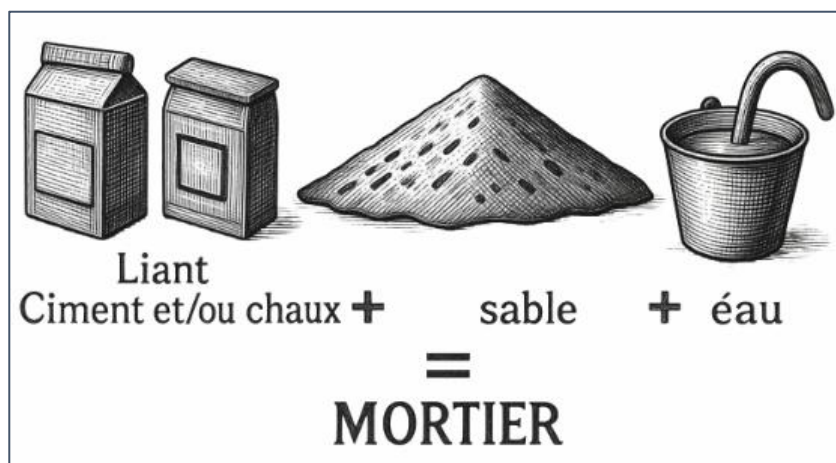


Figure I-1 : Composants du mélange de mortier

I.2.2.1. Les matériaux inertes (Granulats fins) :

Ils sont essentiellement représentés par le sable utilisé dans la préparation du mortier. Le sable provient de la désintégration naturelle ou artificielle des roches sous forme de grains de différentes tailles. Ces matériaux constituent le « squelette » du mortier, car ils contribuent efficacement à l'amélioration de sa résistance grâce à leur dureté, et limitent le phénomène de retrait lors du processus de séchage. [2]

I.2.2.1.a. Définition du sable :

Le sable est l'un des matériaux de base les plus importants dans le domaine de la construction. Il entre dans la composition du béton, la fabrication de briques et de tuiles, ainsi que dans la construction de routes, de ponts et de barrages. Il est considéré comme l'une des ressources naturelles les plus utilisées dans divers domaines de développement.

Le sable se compose de petits grains meubles résultant de la fragmentation des roches et des minéraux, sous l'effet de multiples facteurs naturels. Il est principalement composé de quartz et de silice, ce qui en fait un matériau chimiquement inerte, extrêmement dur et résistant aux diverses conditions climatiques. Ses couleurs varient également selon la nature des roches, des minéraux ou des matières organiques dont il est issu. [3]

I.2.2.1.b. Types de sables utilisés dans la construction :

Parmi les types de sables les plus importants utilisés pour renforcer les matériaux de construction et les travaux publics, on trouve :

❖ **Le sable de mer :**

Ce type de sable s'accumule au fond des mers et aux embouchures des rivières sous l'effet des courants marins. Cependant, il est jugé moins important que le sable de rivière, car il contient souvent une proportion de sels pouvant affecter négativement la durabilité des ouvrages, notamment en provoquant la corrosion de l'acier. De plus, les opérations de dragage du sable marin contribuent à la dégradation de l'environnement marin et augmentent les risques d'érosion côtière. [4]

❖ **Le sable de rivière naturel :**

Il est considéré comme l'un des types de sables les plus purs et les plus utilisés dans la fabrication de divers types de béton. Ses principaux avantages résident dans son homogénéité structurelle et la finesse de ses grains. Il se caractérise par des grains arrondis et une dureté résultant du frottement constant avec les roches lors de son transport par le mouvement de l'eau. En raison de considérations environnementales, l'exploitation de ce type de sable dans les lits de rivières actives est devenue très limitée. [4]

❖ **Le sable de carrière :**

Il résulte des opérations de concassage de roches dures. Les grands blocs rocheux sont extraits par dynamitage, puis broyés progressivement. Ce processus produit des gravillons et du sable. Le sable est extrait des produits de concassage des gravillons broyés (de plus petit diamètre). Ce type de sable constitue une alternative importante aux sables naturels. [4]

❖ **Le sable de dunes :**

Très répandu dans les zones désertiques, c'est un sable blanc pur avec une teneur élevée en silice (SiO_2) dépassant 99%. La taille de ses grains varie entre 25 et 122 microns. Cependant, cette granulométrie limitée est considérée comme inadaptée à une utilisation dans les mélanges de béton en raison de l'absence de diversité dans la taille des grains, ce qui affecte négativement la cohésion et la résistance du béton. [4]

❖ **Le sable artificiel :**

Il provient de processus industriels, tels que le broyage des résidus de laitier fondu issus des hauts fourneaux de l'industrie sidérurgique. Des études récentes ont montré que le béton fabriqué avec ce type de sable possède des propriétés mécaniques similaires à celles du béton fabriqué avec du sable naturel. [4]

I.2.2.1.c. Normes et spécifications internationales pour le sable :

Selon la classification de l'Organisation internationale de normalisation (ISO 84611), le sable est classé selon le diamètre de ses grains comme suit :

- Sable fin : diamètre des grains compris entre 0,16 et 1,2 mm.
- Sable moyen : diamètre des grains compris entre 1,2 et 1,6 mm.
- Sable gros : diamètre des grains compris entre 1,6 et 5 mm.
- Cette classification constitue une base importante pour déterminer le type de sable approprié aux diverses utilisations techniques et structurelles. [2]

I.2.2.2. L'eau :

L'eau est un élément essentiel qui influence directement les propriétés et la performance du mortier. L'utilisation d'une grande quantité d'eau dans le mélange rend le mortier facile à mettre en œuvre (maniabilité), mais entraîne un retrait important après son évaporation, ce qui provoque l'apparition de fissures. En revanche, l'utilisation d'une faible quantité d'eau rend le mortier difficile à utiliser, avec une faible adhérence et une mauvaise cohésion. [3]

I.2.2.2.a. Types d'eaux :

Les ressources hydriques se répartissent dans la nature et dans les milieux techniques selon des cadres diversifiés qui varient en fonction de leur source et de leur composition physico-chimique. Cette diversité constitue le facteur essentiel déterminant leurs domaines d'utilisation et leur adéquation aux différentes applications, qu'elles soient environnementales ou industrielles. Ainsi, ces types peuvent être classés comme suit:

- Eaux des océans et des mers
- Eaux souterraines
- Lacs d'eau douce
- Eau du sol
- Eau du robinet
- Eaux minérales
- Eau distillée
- Eaux de puits
- Eaux de rivières [5]

I.2.2.3. Les liants :

Ce sont des matériaux caractérisés par leur capacité à lier les matières premières par collage. Ils sont mélangés à l'eau pour former une pâte adhésive qui durcit progressivement. [3]

I.2.2.3.a. Le ciment :

Le ciment peut être décrit comme un matériau possédant des propriétés d'adhérence et de cohésion, lui permettant de lier des matériaux fragmentés pour les transformer en une masse compacte et unique. Dans les travaux de construction, le ciment agit comme un liant entre les pierres, le sable et les briques.

Cependant, le ciment présente certains inconvénients qui limitent ses utilisations. Parmi les plus importants, on note la fissuration qui se produit dans les mélanges riches en ciment en raison de ses variations volumétriques. De plus, le mortier de ciment ne résiste pas aux contraintes de traction lorsqu'il y est exposé. [6]



Figure I-2 Ciment Portland

I.2.2.3.b. Désignation du ciment :

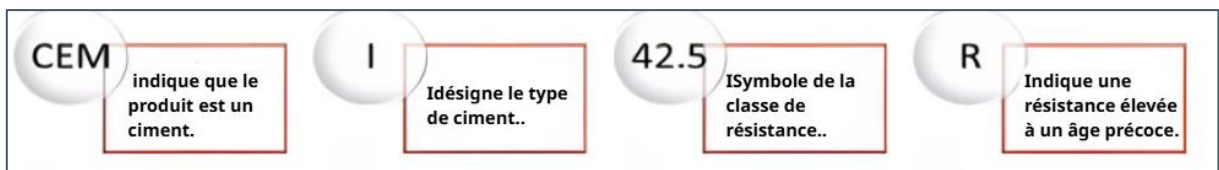


Figure I-3 : Signification de l'abréviation du ciment

I.2.2.3.c. Types de ciments:

1. Ciment Portland (Portland Cement) :

- ❖ **Ciment Portland Ordinaire (CPA / O.P.C)** : Largement utilisé dans la plupart des ouvrages non exposés aux sels de sulfates dans le sol ou les eaux souterraines. [7]

❖ **Ciment Portland à durcissement rapide** : similaire au ciment Portland ordinaire, mais il acquiert sa résistance plus rapidement. Il est utilisé lorsqu'une haute résistance est requise dans un délai court. Il se divise en deux types : [7]

- a- Ciment Portland à durcissement rapide haute performance.
- b- Ciment à haute résistance initiale et super-ordinaire.

2. Ciment expansif (Expansive Cement) :

Fabriqués à partir d'un mélange composé de ciment Portland, d'un agent expansif et d'un stabilisant. [7]

3. Ciment alumineux (Aluminous Cement) :

Il se caractérise par sa haute résistance aux sels de sulfates, cela est dû à l'absence d'hydroxyde de calcium Ca(OH)_2 parmi les produits d'hydratation. Il acquiert environ 25% de sa résistance finale en 24 heures, alors que le ciment Portland ordinaire nécessite une période plus longue (environ 28 jours) pour acquérir l'essentiel de sa résistance. [7]

I.2.2.4. Formation du mortier :

Le mortier se forme suite au durcissement de ses composants constitués d'un mélange de sable et de liants tels que la chaux et le plâtre (qui sont des matériaux favorisant la cohésion), en plus de l'eau. Il est également possible d'incorporer certains améliorants, des colorants et parfois des matières végétales agissant comme renfort de liaison entre les composants.

Le mortier est principalement utilisé pour lier les éléments de construction ; c'est pourquoi une attention particulière est portée à l'étude de ses propriétés, notamment l'adhérence, la résistance et la vitesse de prise avec les autres matériaux de construction, en plus de sa sensibilité aux facteurs climatiques et au temps.

Le processus de préparation du mortier repose sur la disponibilité d'une quantité suffisante de matériaux inertes comme le sable, mélangés ensuite à un liant tel que la chaux, tout en ajoutant l'eau progressivement et en quantités étudiées pour obtenir un mélange homogène et cohérent. Il faut également veiller à éviter que la pâte de liant ne reste sous forme de grumeaux non homogènes ou mal mélangés. [2]

I.2.2.5. Les adjuvants :

I.2.2.5.a. Définition :

Les adjuvants ou additifs sont des substances optionnelles ajoutées au béton (ou mortier) dans le but d'améliorer certaines de ses propriétés et d'optimiser ses performances, sans pour

autant se substituer aux liants. La quantité de ces matériaux dans le mélange varie selon le besoin et la nature du site d'utilisation. [2]

I.2.2.5.b. Types :

1-Additions inertes :

Ce sont des matériaux solides qui peuvent remplacer partiellement le ciment dans le mélange. Les plus courants sont : les cendres volantes, le laitier de haut fourneau granulé et la fumée de silice..[2]

2-Additions actives :

Ce sont des substances souvent liquides, ajoutées au mélange pour améliorer ou modifier des caractéristiques spécifiques, dont les plus importantes sont :

3-Accélérateurs :

Utilisés pour accélérer le processus de durcissement.

4-Plastifiants et superplastifiants :

Ils améliorent la maniabilité sans augmenter la quantité d'eau, ce qui contribue à réduire le rapport eau /ciment (E/C).

5-Entraîneurs d'air :

Utilisés pour créer de fines bulles d'air à l'intérieur du matériau.

6-Réducteurs d'eau :

Ils aident à augmenter la mobilité des particules de ciment au sein du mélange plastique, permettant d'obtenir la même maniabilité avec moins d'eau.[2]

7-Modificateurs de viscosité :

Utilisés pour améliorer la fluidité du béton et augmenter son homogénéité. [2]

I.2.3. Types de mortiers :

Le mortier peut être classé selon plusieurs critères, dont les plus importants sont le type de liant et son utilisation dans la construction

a. Selon le liant :

Mortier de ciment : C'est le type le plus courant, caractérisé par une bonne résistance et une rapidité de prise et de durcissement. Un dosage adéquat en ciment lui confère une propriété d'imperméabilité. Le dosage varie généralement entre 250 et 350 kg de ciment par mètre cube de sable.

1- Mortier de chaux :

Il se caractérise par une résistance inférieure à celle du mortier de ciment, et son temps de durcissement est relativement plus long.

2- Mortier de plâtre :

Préparé à base de liants gypseux, il est utilisé pour des applications spécifiques.

3- Mortier bâtard (Mortier mixte) :

Il utilise plus d'un type de liant, comme le ciment-chaux ou le ciment-argile. Le choix du liant dépend de la nature de l'utilisation et de la finition souhaitée. [8]

b. Selon le mode de préparation et les caractéristiques spécifiques :

Mortier fabriqué sur chantier : Préparé directement sur le site de construction en utilisant du ciment (souvent de type CPA ou CPJ) et du sable. On peut aussi utiliser de la chaux hydraulique ou d'autres liants. Le mélange se fait manuellement ou à l'aide d'une petite bétonnière. [9]

1- Mortier d'enduit :

Utilise un sable dont la taille des grains ne dépasse pas 5 mm. Le dosage le plus courant est d'un volume de liant pour trois volumes de sable. La quantité d'eau est déterminée selon le besoin pour obtenir la consistance appropriée.

2- Mortier industriel (Mortier prédosé) :

Fabriqué en usine à partir de composants secs rigoureusement sélectionnés et conditionnés en sacs, sous un contrôle de qualité strict. Il peut contenir divers liants, sables, adjuvants et colorants.

3- Mortier fibreux :

Obtenu par l'ajout de fibres (fibres de verre, polypropylène, etc.), ce qui lui confère une grande cohésion et réduit la fissuration. Il peut être livré prêt à l'emploi ou en sacs prédosés. [9]

I.2.4. Utilisations du mortier :

Le mortier intervient dans de nombreux domaines de la construction, jouant un rôle essentiel dans la cohésion des éléments structurels et l'amélioration de leurs performances mécaniques et esthétiques.

1- Liaison des éléments de construction :

C'est sa fonction principale. Il est utilisé pour lier les briques ou les pierres, assurant ainsi la solidité et la stabilité des murs. Il contribue également à la répartition homogène des charges entre les unités de maçonnerie.

2- Enduit et protection :

Utilisé pour revêtir les murs intérieurs et extérieurs afin d'améliorer l'aspect esthétique et de protéger les structures contre les agents externes (humidité, variations climatiques), augmentant ainsi leur durée de vie.

3- Nivellement des surfaces (Chapes) :

Le mortier est utilisé pour la réalisation de chapes sur les dalles en béton, afin d'obtenir une surface plane prête à recevoir le revêtement final (carrelage, etc.).

4- Travaux de restauration :

Il joue un rôle crucial dans la réhabilitation des bâtiments anciens, notamment le mortier de chaux qui est compatible avec les matériaux traditionnels, permettant de réparer les fissures sans altérer les propriétés d'origine.

5- Isolation :

Certains types, comme le mortier léger, sont utilisés pour améliorer l'isolation thermique et acoustique des bâtiments grâce à l'incorporation de matériaux légers ou d'adjuvants spécifiques. [10]

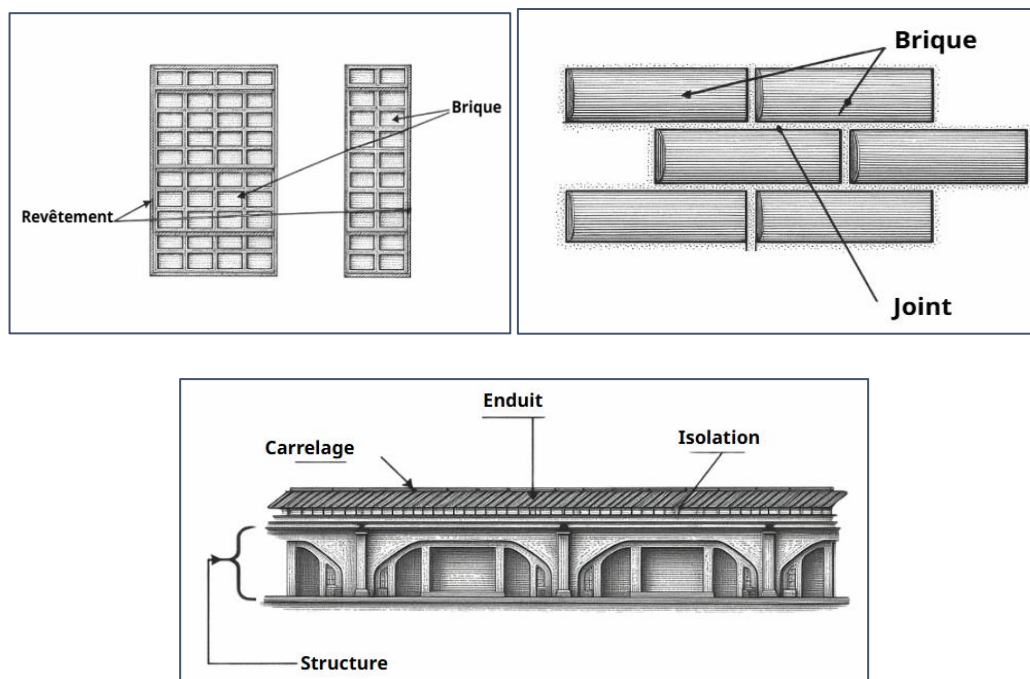


Figure I-4Utilisations du mortier [10]

I.2.5. Dosage des mortiers :

On distingue quatre types de mortiers d'après le dosage de liant que se soit ciment ou la chaux.

Tableau I- 1 Type des mortiers selon le dosage des liants. [11]

mortier	dosage	utilisation
Maigre	250 à 400 Kg/m ³ CPA ou CPA + chaux	Mortier de maçonnerie- -en élévation
	300 à 350 Kg/m ³ CPA ou CPA + chaux	Chape pour revêtement
Moyen	400 à 500 Kg/m ³ CPA ou CPA + chaux	- Enduits extérieurs Enduits intérieurs- Maçonneries fortement chargées
Gras (riche)	500 à 600 Kg/m ³ CPA ou CPA + chaux	-Enduit extérieurs
Très gras (ou très riche)	Plus de 600 Kg/m ³ CPA ou CPA+ chaux	- Chapes d'usure - Enduits étanches - Jointement - rejointoiement - Coulis de ciment

I.2.6. Propriétés du mortier à l'état frais et à l'état durci :

Le mortier se caractérise par un ensemble de propriétés qui déterminent son comportement et ses performances à différentes étapes de son utilisation. On distingue ses propriétés à l'état frais de celles après durcissement. Ces caractéristiques sont essentielles pour évaluer la qualité du mortier et son aptitude à l'emploi dans la construction. [11]

I.2.6.1. Propriétés du mortier à l'état frais :

I.2.6.1.1. Maniabilité (Ouvrabilité) :

La maniabilité est considérée comme l'une des propriétés physiques spécifiques du mortier. C'est un moyen d'évaluer l'ouvrabilité ; un mortier ordinaire nécessite une quantité normale d'eau, ce qui se traduit par le rapport E/C. Dans des conditions normales, ce rapport avoisine 0,5 . Cette propriété est liée à la finesse du mélange global.

1- Essai de maniabilité :

On place le mortier sur la table à secousses (l'appareil), puis on observe la valeur de l'affaissement ou de l'étalement. À partir de cette valeur, on détermine la qualité du mortier. Le mortier est classé selon sa maniabilité en trois catégories :

- Mortier ferme.
- Mortier plastique.
- Mortier très plastique. [11]

Tableau I-2 Type des mortiers selon le dosage des liants.

Type de mortier	Valeur en mm
Mortier ferme	< 140
Mortier plastique	$140 \leq V < 200$
Mortier très plastique	> 200

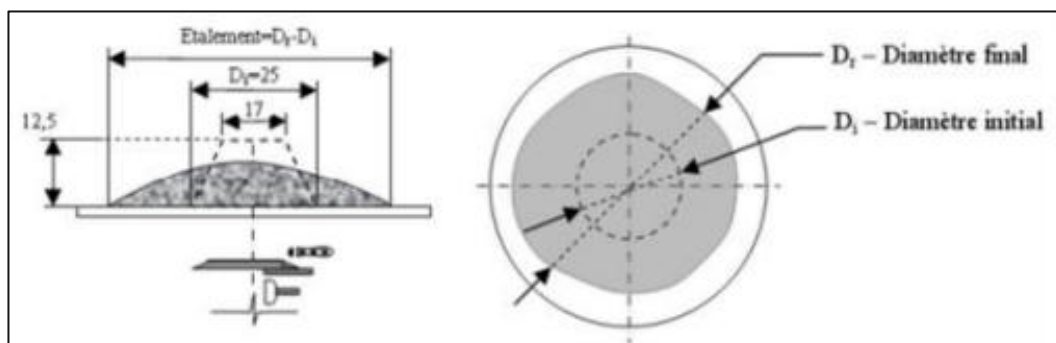


Figure I-5 Consistance du mortier sur la table à secousses

2-Description de l'appareil :

L'appareil utilisé pour tester la maniabilité est appelé "Table à secousses" (ou table à chocs). Il s'agit d'un essai expérimental utilisé pour vérifier la consistance du mortier en déterminant la valeur d'étalement et l'homogénéité du mortier frais.

$$E\% = 100 \frac{D_r - D_i}{D_i}$$

Avec :

Dr = diamètre final et **Di** = diamètre initial.

Le temps t mis par le mortier pour s'écouler caractérise sa consistance, ce temps sera d'autant plus court que le mortier sera plus fluide comme illustré au tableau II.13.

Tableau I-3 Classe de consistance des bétons

classe de consistance	durée (en s)
Ferme	$t \geq 40$
Plastique	$20 < t \leq 30$
Très Plastique	$10 < t \leq 20$
Fluide	$t \leq 10$

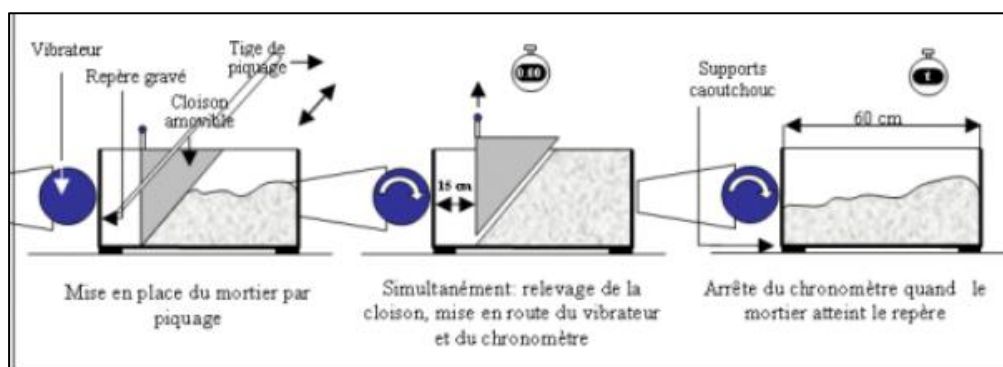


Figure 1-6 Principe de fonctionnement du maniabilimètre

I.2.6.2. Propriétés de mortier à l'état sec :

I.2.6.2.1. Résistances mécaniques :

Les essais sont souvent effectués sur les éprouvettes prismatiques de 4 x 4 x 16 cm conservés dans l'eau à 20 °C.

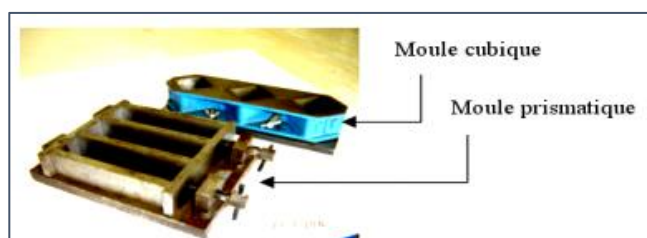


Figure I-7 Moule pour moulage des éprouvettes de mortier [11]

Les éprouvettes sont rompues en traction par flexion puis en compression. Les résistances, aussi bien en traction par flexion qu'en compression, progressent à peu près comme logarithme du temps (entre 1 et 28 jours).

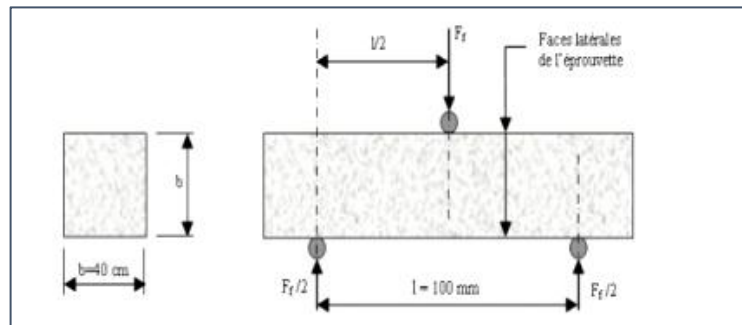


Figure I-8 Dispositif pour l'essai de résistance à la flexion. [11]

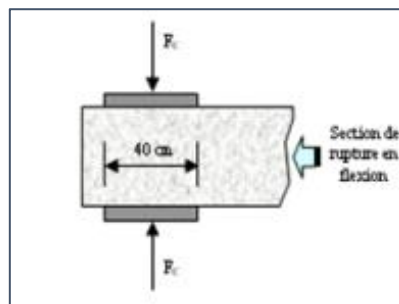


Figure I-9 Dispositif de rupture en compression. [11]

❖ Les résistances des mortiers dépendent de très nombreux facteurs:

- Nature et dosage en ciment.
- Rapport e/c.
- Granulométrie et nature du sable.
- Energie de malaxage et mise en œuvre.
- Protection les tous premiers jours.

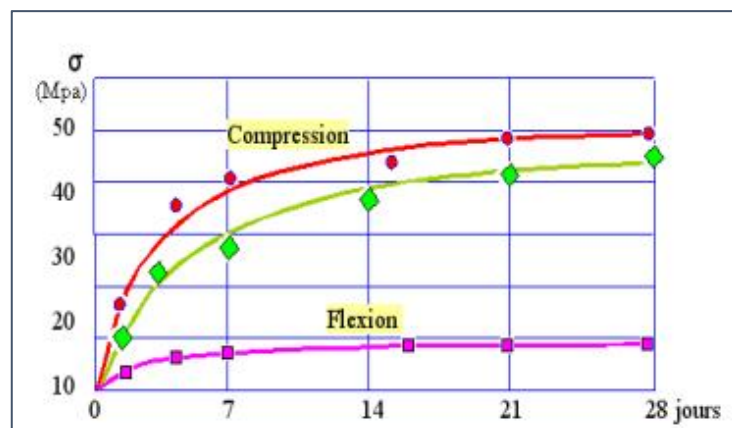


Figure I-10 Résistance du mortier normal [11]

I.2.6.2.2. Retraits et gonflements :

L'évaluation des variations dimensionnelles (gonflement en milieu aqueux et retrait à l'air libre) s'effectue généralement sur des éprouvettes prismatiques ($4 \times 4 \times 16$ cm). Ces essais sont réalisés sur un mortier dit « normal » afin de caractériser spécifiquement les performances du liant.[11]

A. Le Retrait :

Le retrait est mesuré sur des prismes en mortier (dosage 1/3) équipés de plots métalliques à leurs extrémités. Après démoulage, ces échantillons sont conservés dans une enceinte régulée à une température de 20°C et une humidité relative de 50 %. Selon la norme **NF P 15-361**, l'évolution du retrait suit approximativement une progression logarithmique durant les 28 premiers jours. [12]

Il est important de noter les points suivants concernant l'évolution du retrait :

- **Vitesse de réaction** : Le mortier subit un retrait plus rapide que la pâte pure de ciment.
- **Comparaison Mortier / Pâte pure** : Le rapport entre le retrait de la pâte pure et celui du mortier augmente avec le temps. Initialement compris entre 1,5 et 2,5, ce rapport atteint 2,5 à 3,5 au bout d'un an.
- **Moyenne globale** : En règle générale, le retrait mesuré sur le mortier est 2 à 3 fois inférieur à celui de la pâte pure pour un même ciment, grâce à l'effet stabilisateur du sable.

B. Le Gonflement :

À l'inverse du retrait, le gonflement se produit lorsque les éprouvettes sont immergées de façon permanente. La mesure est réalisée sur des prismes identiques ($4 \times 4 \times 16$ cm) conservés dans une eau à 20°C . [13]

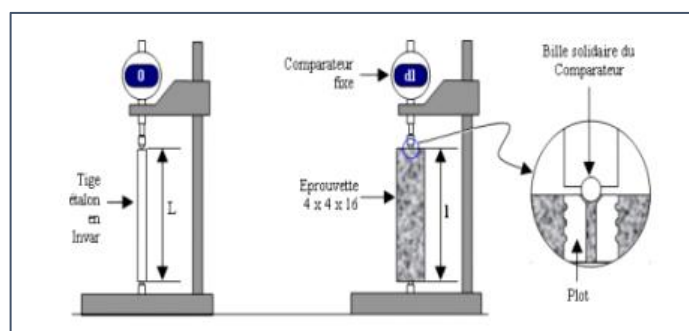


Figure I-11 Appareillage pour la mesure du retrait [11]

I.2.6.2.3. Absorption d'eau par capillarité :

L'absorption capillaire est une propriété hydrique qui reflète la capacité de l'échantillon à absorber une certaine quantité d'eau par unité de temps et par unité de surface, lorsqu'une

seule face est en contact direct avec l'eau. Le taux d'absorption capillaire de l'eau est exprimé en unités de $(g/m^2 \cdot s)$.

A/- Procédure de l'essai :

Cet essai consiste à suivre la cinétique de l'absorption capillaire à travers la quantité d'eau absorbée par unité de surface de l'échantillon en contact avec l'eau, en fonction de la racine carrée du temps.

- **Pesée des échantillons** : Les échantillons sont pesés à l'état sec.
- **Immersion partielle** : Les échantillons sont placés dans un bac à eau de manière à permettre un contact permanent d'une seule face avec une lame d'eau de $(3 \pm 1 \text{ mm})$.
- **Suivi pondéral** : Les échantillons sont pesés au fil du temps à des intervalles définis par la norme.
- **Forme des éprouvettes** : Les échantillons testés peuvent être de forme cubique ou cylindrique.[14]

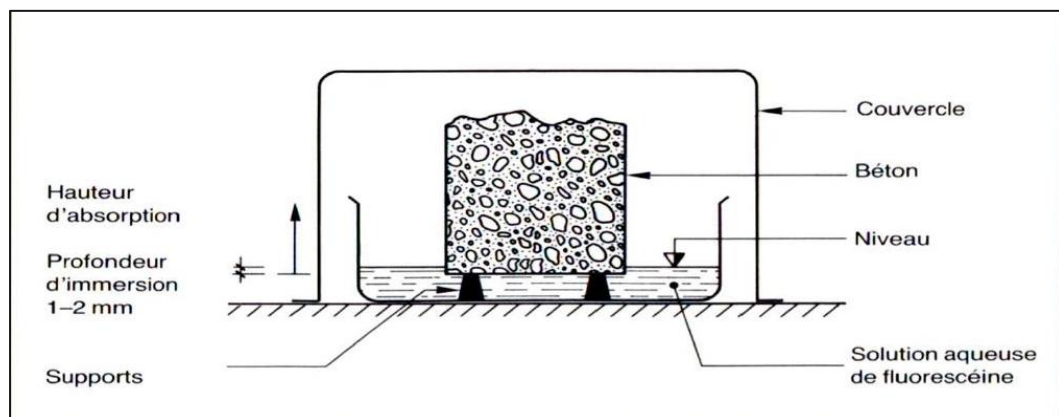


Figure I-12 Essai d'absorption d'eau par capillarité [14]

I.2.6.2.4. Essai par ultrasons :

Dans cette méthode, des impulsions sous forme d'ondes ultrasonores sont générées pour traverser la partie testée, et leur temps de parcours est déterminé. La vitesse de ces impulsions à travers un corps solide dépend de la densité du matériau testé et de ses propriétés élastiques.

Méthodes de placement de l'émetteur et du récepteur sur l'échantillon : Il existe trois méthodes pour placer l'émetteur et le récepteur sur l'échantillon, dont les plus importantes sont:

- **Transmission directe (Direct Transmission) dans deux directions opposées** : Elle est utilisée lorsqu'il est possible de placer l'émetteur et le récepteur dans cette position, et elle est considérée comme la meilleure configuration.

- **Transmission semi-directe (Semi-direct Transmission) :** La transmission se fait le long de la surface dans le cas où l'accès n'est possible qu'à une seule surface de l'élément testé. Dans ce cas, l'opération est moins efficace que la précédente car la plus grande partie de l'énergie se dirige vers l'intérieur du béton.
- **Transmission indirecte (Indirect Transmission) sur la même surface :** Cette méthode ne donne pas d'informations sur le béton faible situé sous la surface dure consolidée. De plus, la détermination de la longueur du trajet est moins précise, et il a été constaté que la vitesse dans ce cas est inférieure à celle du mode direct[14]

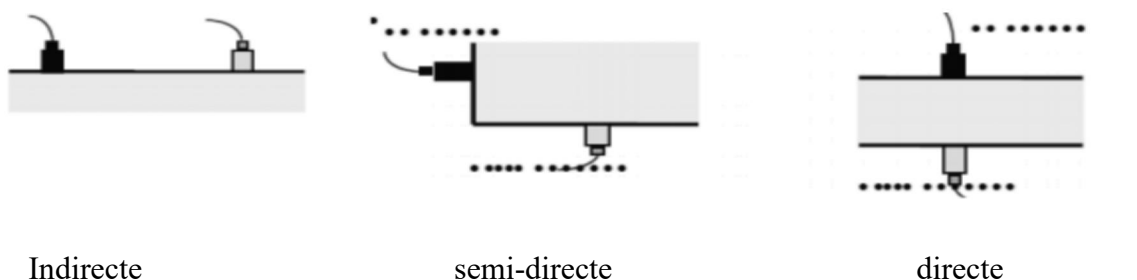


Figure I-13 illustrant les différentes configurations de l'émetteur et du récepteur[14]

Tableau I-4 Classification de la qualité du mortier en fonction de la vitesse de propagation des ultrasons

Vitesse de propagation (m/s)	Qualité
Supérieure à 4500	Excellente
3500 – 4500	Bonne
3000 – 3500	Acceptable
2000 – 3000	Mauvaise
Inférieure à 2000	Très mauvaise

I.3. Valorisation des déchets en génie civil :

Les déchets solides constituent l'un des problèmes environnementaux majeurs à l'échelle mondiale et une source importante de pollution. Ils engendrent de nombreux impacts sanitaires et économiques, directs et indirects, dans divers pays.

Le processus de recyclage de ces déchets dans le domaine de la construction et du béton permet d'atteindre une stabilité économique et sociale, contribuant à la création de richesse dans le cadre du développement durable et de la préservation de l'environnement. [15]

I.3.1. Aperçu historique du recyclage des déchets :

Le recyclage est défini comme le processus de réutilisation des déchets pour fabriquer de nouveaux produits, dont la qualité est souvent inférieure à celle du produit d'origine. Historiquement, cette pratique a émergé durant la Première et la Seconde Guerre mondiale, lorsque les nations faisaient face à de graves pénuries de matières premières essentielles, telles que le caoutchouc, les obligeant à collecter ces matériaux parmi les débris pour les réintégrer dans la production. Au fil des décennies, le recyclage est devenu l'un des piliers fondamentaux de la gestion des déchets, en raison de ses multiples vertus environnementales. Pendant longtemps, le "recyclage direct" par les producteurs de déchets a constitué la forme primaire de valorisation ; toutefois, le début des années 1990 a marqué un tournant vers le "recyclage indirect". Ce dernier repose sur la transformation industrielle des déchets pour créer de nouveaux produits dérivés de la même matière première, à l'instar du recyclage du verre, du papier, du plastique et de l'aluminium [16]

I.3.2. Définition des déchets solides :

Les déchets solides sont l'ensemble des matériaux non liquides résultant des différents types d'activités humaines, dont on se débarrasse faute d'utilité immédiate. De manière générale, le terme désigne également les matériaux résistants à la décomposition ou ceux qui se décomposent très lentement, tels que : le verre, le fer, l'aluminium, le plastique, ainsi que les résidus des opérations de construction et de démolition (pièces de bois, éléments métalliques, blocs de béton), les produits d'excavation routière et les terres de voirie, en plus des résidus miniers et industriels.

La plupart de ces matériaux sont recyclables et peuvent être réutilisés comme matières premières pour de nouvelles industries. La proportion des déchets solides varie d'une région à l'autre, tant en quantité qu'en qualité, selon les caractéristiques de la société, ses conditions, la diversité des modes de consommation et de comportement, ainsi que l'inégalité des niveaux de revenus. [17]

Tableau I-5 Taux de production des déchets solides dans certains pays du monde [17]

Production de déchets dans certains pays du monde			
Pays	Production de déchets (kg/hab/jour)	Pays	Production de déchets (kg/hab/jour)
Émirats	1.2	Égypte	0.81
Bahreïn	1.3	Syrie	0.33

Arabie Saoudite	1.4	Tunisie	0.41
Oman	0.7	Maroc	0.33
Qatar	1.3	Jordanie	0.6
Japon	0.87	Yémen	0.6
États-Unis	1.98	Algérie	1.2
Australie	1.9	France	0.77
Allemagne	1.1	Royaume-Uni	0.8

I.3.3. Types de déchets solides :

L'adjectif « solide » fait référence à ce qui est consistant, résistant et stable. Par conséquent, un corps solide maintient la stabilité de son volume et de sa forme grâce à la forte cohésion de ses molécules. Cette caractéristique permet de distinguer cet état des autres états de la matière, tels que l'état liquide ou gazeux, lors de la collecte des matériaux. [18]

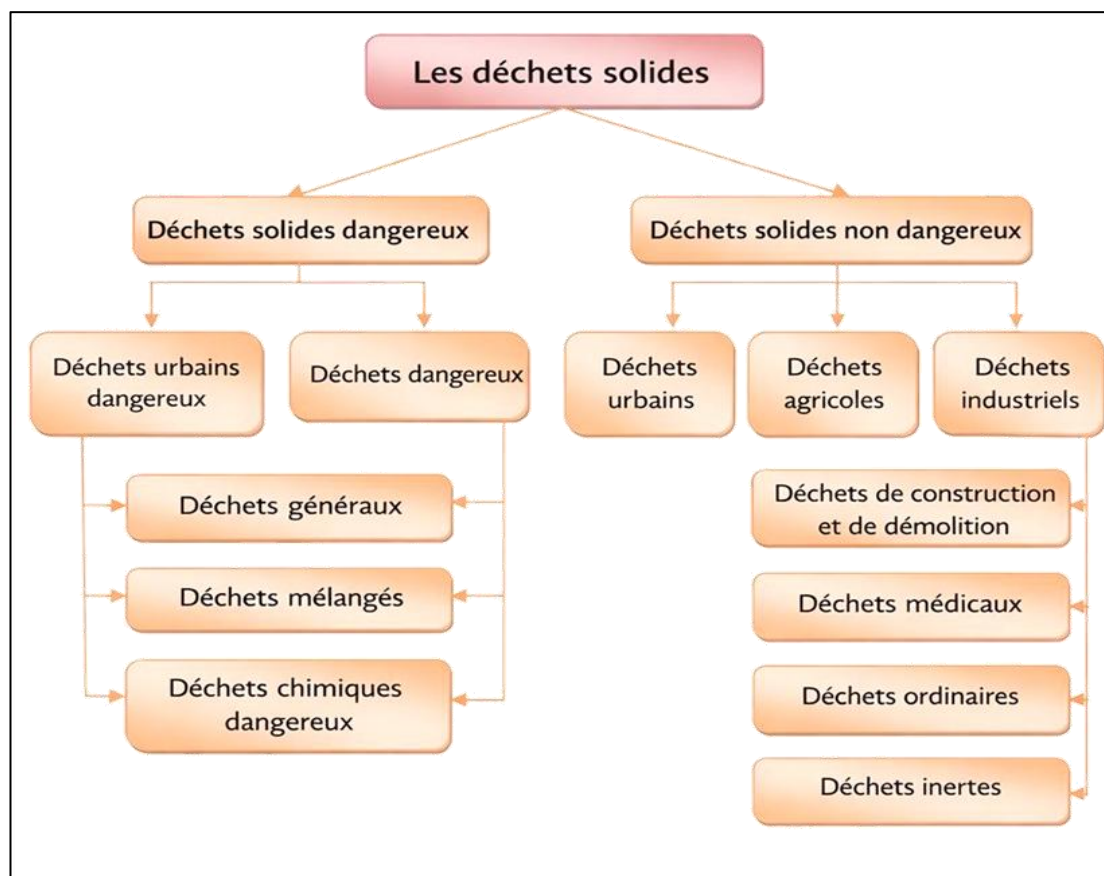


Figure I-14 Types de déchets solides [18]

I.3.4. Importance du recyclage des déchets dans le domaine du génie civil :

Dans le contexte des travaux de génie civil, les déchets sont également considérés comme une source précieuse de matières premières. La récupération et le recyclage des déchets peuvent contribuer à réduire l'utilisation de matériaux vierges dans la production de

nouveaux produits. Le recyclage des déchets de construction et de démolition permet aussi de préserver l'espace des décharges et d'économiser d'importantes quantités de matériaux. Il existe trois catégories principales de déchets : les déchets inertes (résidus de construction et de démolition), les déchets non dangereux (papier, bois, restes de béton) et les déchets dangereux comme [certains types de] verre. [19]

I.3.5. Impacts environnementaux de l'industrie cimentière:

L'industrie du ciment constitue l'un des piliers fondamentaux du secteur de la construction ; cependant, elle impose simultanément des défis environnementaux majeurs qui dépassent les limites des usines pour affecter l'écosystème mondial. Le danger principal réside dans le fait qu'il s'agit d'une industrie à forte intensité de carbone, où d'énormes quantités de dioxyde de carbone (CO_2) sont libérées lors du processus chimique de « calcination » du calcaire, ainsi que par la combustion de combustibles fossiles pour générer des températures atteignant 1450°C . Cela rend ce secteur responsable, à lui seul, d'environ 8% des émissions mondiales de gaz à effet de serre.

L'impact environnemental ne se limite pas aux gaz à effet de serre, il s'étend également à la pollution de l'air par les particules fines et la poussière (Dust) qui se dépose sur les terres agricoles, entraînant une dégradation de la qualité du sol et l'obstruction des pores des plantes. En outre, la consommation massive de ressources naturelles et d'eau provoque un déséquilibre écologique dans les zones entourant les carrières et les usines.

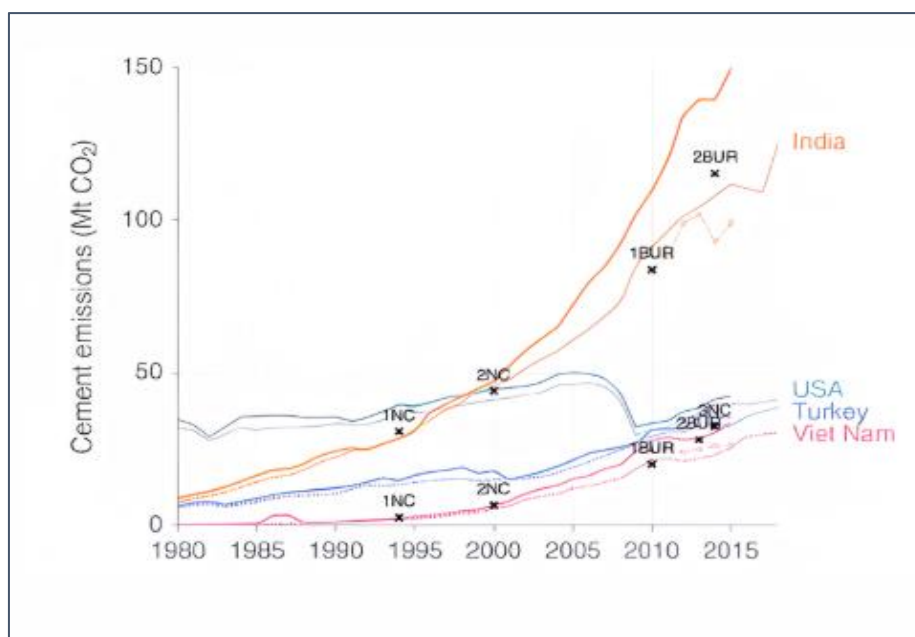


Figure I-15 Comparaison des nouvelles estimations des émissions de ciment (lignes en pointillés)

Les nouvelles estimations pour les États-Unis et la Turquie proviennent directement de sources officielles nationales. Les estimations de la base de données EDGAR v4.3.2_FT2015 sont présentées pour l'Inde et le Viet Nam avec des marqueurs ronds [20]

Cette étude a porté sur l'analyse des émissions historiques et récentes dans les principaux pays producteurs de ciment (tels que la Chine, l'Inde et les pays de l'Union Européenne). Elle a démontré que la croissance continue de la production dans les pays en développement exerce une pression énorme sur les objectifs climatiques mondiaux (tels que l'Accord de Paris sur le climat).

Les résultats indiquent que certains pays ont enregistré des augmentations constantes de la concentration de particules en suspension dans les zones industrielles, entraînant une hausse notable des coûts sanitaires et environnementaux. Ces constats imposent la nécessité de s'orienter vers le « ciment vert » et la valorisation des déchets industriels afin de réduire la dépendance au clinker traditionnel. [20]

I.4. Le verre :

I.4.1. Définition du verre :

Le verre est un matériau solide inorganique, généralement caractérisé par sa transparence ou sa translucidité. Il possède une surface lisse et brillante, il est fragile et cassant, en plus d'être imperméable aux liquides et aux gaz. Bien qu'utilisé depuis l'Antiquité, il occupe toujours une place prépondérante dans de nombreux domaines, tels que la construction, l'industrie domestique et les équipements de communication.

Le verre se distingue par sa structure amorphe et sa teneur élevée en dioxyde de silicium (SiO_2), ce qui lui permet de manifester une activité pouzzolanique lorsqu'il est broyé en fines particules. Ainsi, il peut être utilisé comme substitut partiel au ciment Portland dans les mélanges, contribuant à l'amélioration de certaines propriétés physiques et mécaniques du mortier ou du béton.[21]

Constituants chimiques du verre:

La composition chimique type du verre (verre sodo-calcique) est la suivante :

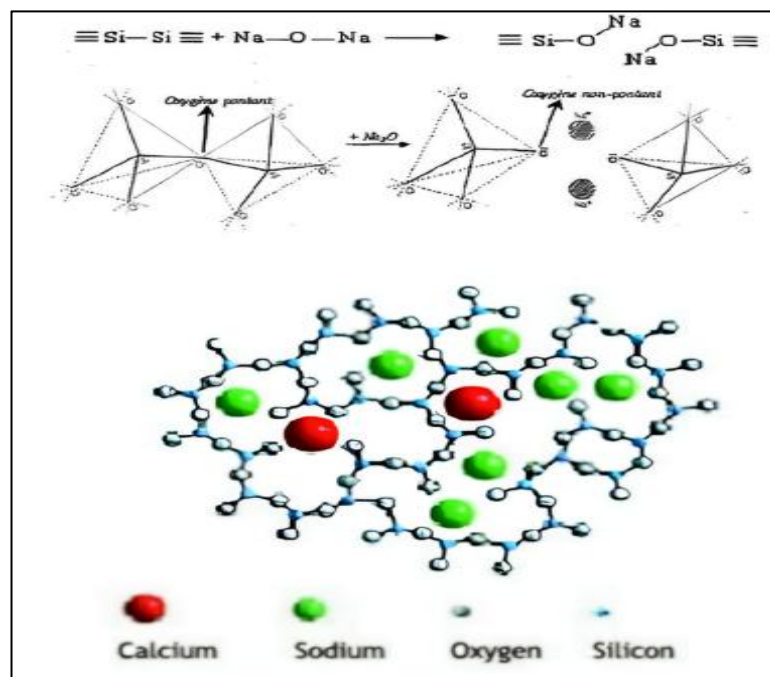


Figure I-16 Constituants chimique du verre [21]

Dioxyde de silicium (SiO_2) $\approx 70 - 75 \%$

Oxyde de sodium (Na_2O) $\approx 12 - 15 \%$

Oxyde de calcium (CaO) $\approx 8 - 12 \%$

Autres oxydes (Al_2O_3 , MgO ...) en faibles proportions

I.4.2. Sources :

Les sources de déchets de verre sont multiples. Les études indiquent qu'ils proviennent principalement de la consommation quotidienne de produits verriers, tels que les bouteilles et les ustensiles ménagers, en plus des résidus du secteur du bâtiment comme le verre des fenêtres et des portes. De même, les industries verrières contribuent à la production de quantités considérables de déchets lors des processus de fabrication et de façonnage. [21]

I.4.3. Étapes de recyclage des déchets de verre :

Le recyclage des déchets de verre pour une utilisation dans les matériaux de construction passe par plusieurs étapes successives :

- **Collecte et tri** : Les déchets de verre sont collectés à partir de différentes sources et triés selon la couleur (transparent, vert, ambré) afin de garantir la qualité du produit final.
- **Concassage primaire** : Le verre est concassé à l'aide de machines spéciales pour réduire sa taille en petits morceaux.

- **Lavage et nettoyage** : Les morceaux concassés sont lavés pour éliminer les impuretés organiques et les contaminants.
- **Séchage** : Les morceaux sont séchés pour éliminer l'humidité jusqu'à ce qu'elle ne dépasse pas 2%.
- **Broyage fin** : Le verre séché est broyé à l'aide d'un broyeur à boulets (Ball Mill) pour obtenir une poudre fine avec une taille de particules inférieure à 75 microns.
- **Classification granulométrique** : La poudre est classée à l'aide de tamis pour séparer les particules selon les tailles requises.[22]

I.4.4. Poudre de verre :

La poudre de verre est obtenue par le broyage du verre récupéré jusqu'à atteindre un haut degré de finesse. Lorsqu'elle est introduite dans le mélange cimentaire en tant que substitution partielle au ciment, elle agit comme un matériau pouzzolanique. Elle réagit avec l'hydroxyde de calcium issu de l'hydratation du ciment pour former des composés cimentaires additionnels, notamment le gel de silicate de calcium hydraté (C-S-H). Cela contribue à l'amélioration de la microstructure et des propriétés mécaniques du mortier.



Figure I-17 Poudre de verre

I.4.5. Propriétés de la poudre de verre :

Les propriétés physiques et chimiques du verre lui confèrent des caractéristiques distinctives et importantes. L'une de ses propriétés physiques les plus remarquables est que, lorsqu'il est transformé en poudre avec une taille de particules inférieure à 75 μm , il présente une bonne activité pouzzolanique en raison de sa forte teneur en silice

Masse volumique apparente : 988kg/m^3

Masse volumique réelle : kg/m^3 2469

Surface spécifique (Blaine SSB) : cm^2/g 3300 [21]

I.4.6. Valorisation de la poudre de déchets de verre dans le domaine des matériaux de construction :

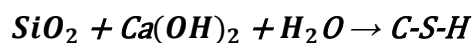
Ces déchets constituent une source de pollution environnementale ; toutefois, ils peuvent être exploités efficacement par le recyclage sous forme de poudre de verre, utilisée comme substitut partiel aux granulats ou au ciment dans le béton. Cette approche contribue à la réduction des coûts de production, à la rationalisation de la consommation des ressources naturelles, tout en limitant les émissions de gaz liées à l'industrie cimentière.

L'objectif principal est de développer un béton économiquement viable avec un faible impact environnemental, en intégrant la poudre de verre parmi ses constituants conventionnels. [18] [19]

I.4.7. Activité pouzzolanique de la poudre de verre

La poudre de verre est considérée comme l'un des matériaux pouzzolaniques prometteurs dans le domaine des matériaux de construction, en raison de sa forte teneur en dioxyde de silicium (SiO_2), qui peut dépasser 70 % de sa composition chimique. Lorsqu'elle est broyée en particules très fines, elle devient plus apte à réagir avec l'hydroxyde de calcium Ca(OH)_2 issu de l'hydratation du ciment, particulièrement en présence d'eau. Cette réaction conduit à la formation de silicate de calcium hydraté (C-S-H), qui est le principal composé responsable de la résistance et de la cohésion du mortier et du béton.

Cette réaction pouzzolanique peut être représentée par l'équation suivante :



La formation de quantités supplémentaires de C-S-H améliore la microstructure du mortier en réduisant les vides capillaires et la porosité interne, ce qui augmente la densité de la pâte de ciment et améliore les propriétés mécaniques, notamment la résistance à la compression. De plus, la réaction pouzzolanique consomme une partie de l'hydroxyde de calcium, considéré comme un composé relativement faible au sein de la structure cimentaire, améliorant ainsi la durabilité et la résistance aux agents chimiques tels que les sulfates.

L'efficacité de la poudre de verre augmente avec sa finesse, car les particules fines offrent une plus grande surface spécifique pour la réaction chimique. En outre, la nature amorphe du verre aide à accélérer la réaction pouzzolanique par rapport aux matériaux cristallins moins réactifs. Les études microscopiques et les analyses MEB et ATG ont montré que l'utilisation de la poudre de verre conduit à une structure plus cohérente et dense grâce à la formation de C-S-H secondaire et à la réduction des cristaux d'hydroxyde de calcium dans le mortier [23]

Le traitement thermique joue également un rôle pivot dans le renforcement de cette activité, car il agit sur la décomposition des liaisons vitreuses amorphes et libère de plus grandes quantités de SiO_2 réactif. Cela génère une production accrue de C-S-H, améliorant ainsi la structure interne du mortier et augmentant sa résistance mécanique.

I.5. Le Marbre :

I.5.1. Définition du marbre :

Le marbre est un matériau naturel solide d'origine sédimentaire ou métamorphique, composé principalement de carbonate de calcium (CaCO_3). Il se distingue par sa dureté, son aspect brillant et sa facilité de façonnage. Le marbre est largement utilisé dans les domaines de la construction et de la décoration. Ses processus de coupe et de polissage génèrent des quantités considérables de déchets sous forme de poudre fine.

❖ Constituants :

La composition chimique du marbre est généralement dominée par :

Carbonate de calcium 99 – 95% $\approx (\text{CaCO}_3)$

Carbonate de magnésium (MgCO_3) : en faible proportion.

Oxydes de fer (Fe_2O_3) : avec des traces de silice (SiO_2). [24]

I.5.2. Sources :

Les déchets de marbre proviennent principalement des activités liées à son extraction et à son traitement. Les carrières constituent la première source de ces déchets, résultant des opérations de découpe primaire des blocs de marbre. De plus, d'importantes quantités de résidus sont générées lors des phases de fabrication dans les ateliers, notamment pendant les processus de sciage, de tronçonnage et de polissage, où se forment de la fine poussière de marbre et des chutes inutilisables.

En outre, les ateliers de transformation du marbre contribuent à la production de quantités considérables de poudre issue des opérations de ponçage, qui est souvent rejetée comme déchet industriel sans exploitation. Les déchets de marbre peuvent également résulter d'opérations de démolition ou de réhabilitation de bâtiments contenant des éléments en marbre. [24]

I.5.3. Étapes de recyclage des déchets de marbre :

Les déchets de marbre proviennent essentiellement des opérations de découpe et de sciage dans les carrières et les usines de transformation du marbre. Leur recyclage passe par les étapes suivantes :

- **Collecte et rassemblement** : Les résidus de marbre issus des opérations de découpe et de façonnage sont collectés dans les carrières et les usines.
- **Tri et classification** : Les déchets sont triés selon leur taille et leur type afin d'éliminer les matières indésirables.
- **Concassage** : Les grands morceaux sont concassés à l'aide de machines de concassage pour obtenir des tailles plus petites.
- **Broyage** : Les morceaux concassés sont broyés dans des moulins spéciaux pour obtenir une poudre fine.
- **Tamissage** : La poudre est tamisée pour obtenir la distribution granulométrique souhaitée.
- **Séchage** : La poudre est séchée au four pour éliminer l'humidité avant utilisation.[25]

I.5.4. Poudre de marbre :

La poudre de marbre peut être obtenue en collectant les déchets de marbre issus des opérations de découpe et de polissage, puis en les séchant et en les broyant pour atteindre une finesse appropriée. Lorsqu'elle est ajoutée au mortier en tant que substitution partielle au ciment, elle contribue à l'amélioration de la maniabilité et de certaines propriétés physiques, notamment avec des taux de substitution modérés. En revanche, une utilisation excessive peut entraîner une baisse de la résistance mécanique en raison de la réduction de la teneur effective en ciment.



Figure I-18 Poudre de marbre

La poudre de marbre se distingue par son caractère non pouzzolanique, en raison de sa nature chimique qui ne lui permet de réagir avec l'hydroxyde de calcium, contrairement aux matériaux pouzzolaniques. Néanmoins, elle joue un rôle important en tant que matériau de remplissage (Filler). Elle contribue à l'amélioration de la granulométrie et au comblement des vides à l'intérieur du mélange, ce qui conduit à une meilleure compacité et à une réduction de la porosité. [24]

I.5.5. Propriétés de la poudre de marbre :

Les propriétés physiques et chimiques de la poudre de marbre sont des facteurs essentiels qui lui confèrent des caractéristiques distinctives dans le domaine de la construction. Elle se caractérise par une grande finesse et une structure granulaire fine qui aide à améliorer la cohésion des mélanges cimentaires. Contrairement au verre, la poudre de marbre ne présente pas d'activité pouzzolanique significative, étant composée essentiellement de carbonate de calcium. Cependant, elle joue un rôle important en tant que matériau de remplissage (Filler), contribuant à la réduction de la porosité et à l'amélioration de la microstructure du mortier.

Masse volumique apparente : 1300 kg/m^3

Masse volumique réelle : 2700 kg/m^3

Surface spécifique (Blaine SSB) : $4000 - 3000 \text{ cm}^2/\text{g}$ [26]

I.5.6. Valorisation de la poudre de déchets de marbre dans le domaine des matériaux de construction :

Les déchets de marbre constituent une source de pollution environnementale, notamment en raison des volumes importants générés par les opérations de découpe et de polissage dans les carrières et les ateliers de transformation. Toutefois, ces déchets peuvent être exploités efficacement grâce au recyclage sous forme de poudre de marbre, utilisée comme substitut partiel au ciment dans le béton ou le mortier.

Cette approche contribue à la réduction des coûts de production et à la rationalisation de la consommation des matières premières, tout en limitant les impacts environnementaux liés à l'élimination anarchique de ces résidus. De plus, l'incorporation de la poudre de marbre permet d'améliorer certaines propriétés physiques des mélanges cimentaires, particulièrement en termes de cohésion et de compacité. L'objectif principal est de développer des matériaux de construction économiquement viables avec un faible impact environnemental, en valorisant les déchets de marbre et en les intégrant parmi les constituants conventionnels.

I.5.7. Effet physique de la poudre de marbre

La poudre de marbre diffère de la poudre de verre par la nature de son interaction avec le ciment. Étant composée principalement de carbonate de calcium (CaCO_3) son activité considérée comme limitée par rapport aux matériaux riches en silice. Cependant, elle contribue de manière significative à l'amélioration des propriétés du mortier grâce à ses effets physique et chimique au sein de la pâte cimentaire.

Sur le plan physique, les fines particules de poudre de marbre agissent comme un effet de remplissage (Filler Effect). Elles comblent les micro-vides entre les grains de ciment et de sable, ce qui améliore la compacité granulaire et réduit la porosité interne. Cela se traduit par une augmentation de la densité du mortier et une meilleure adhérence entre ses composants, influençant positivement la résistance à la compression et la durabilité.

Sur le plan chimique, la présence de carbonate de calcium favorise les réactions d'hydratation au sein de la pâte de ciment et peut contribuer à la formation de composés stables, ce qui améliore la microstructure et réduit la perméabilité. Les résultats de la microscopie électronique à balayage (MEB) ont montré que les mélanges contenant de la poudre de marbre possèdent une structure plus cohérente et moins poreuse que les mélanges de référence, particulièrement à des taux de substitution modérés.

Lors de la combinaison de la poudre de marbre avec la poudre de verre, un effet synergique important est réalisé : la poudre de verre apporte l'activité pouzzolanique et la formation de C-S-H supplémentaire, tandis que la poudre de marbre améliore la compacité et le remplissage des micro-vides. Cette combinaison permet d'obtenir un mortier plus dense et plus homogène, avec une amélioration nette des propriétés mécaniques et de durabilité, telles que la réduction de l'absorption d'eau et de la porosité[23]

Le traitement thermique accentue ces effets, car il active la surface des grains de marbre et augmente leur réactivité avec les composants du ciment.

I.6.Conclusion

Dans ce chapitre, une étude générale a été menée sur le mortier en tant que matériau de construction essentiel. Sa définition ainsi que ses constituants fondamentaux — à savoir les granulats (matières inertes), l'eau et les liants — ont été présentés, en plus des adjuvants qui contribuent à l'amélioration de ses propriétés. Les processus de formation du mortier et ses différents types ont également été abordés selon leur composition et leur fonction, tout en mettant en évidence ses principales applications dans le domaine du bâtiment.

De plus, les caractéristiques fondamentales du mortier ont été traitées, tant à l'état frais (maniabilité, cohésion) qu'à l'état durci (résistance à la compression, à la flexion, retrait et durabilité), étant donné l'influence directe de ces propriétés sur la performance et la qualité du matériau.

Dans le cadre de la construction durable, la valorisation des déchets en génie civil a été examinée à travers la définition des déchets solides et de leurs typologies, tout en soulignant l'importance du recyclage pour réduire l'impact environnemental et rationaliser la consommation des ressources naturelles. Dans ce contexte, les impacts environnementaux de l'industrie cimentière ont été exposés, celle-ci étant l'une des principales sources d'émissions de gaz à effet de serre, notamment le CO₂, ce qui justifie la recherche d'alternatives pour atténuer ces émissions.

L'accent a été mis sur le verre comme l'un des déchets les plus valorisables ; sa définition, ses sources et les caractéristiques de sa poudre ont été présentées, en insistant particulièrement sur son activité pouzzolanique. Cette dernière permet son utilisation comme substitut partiel au ciment, contribuant ainsi à l'amélioration de certaines propriétés du mortier et à la réduction de l'empreinte écologique.

Dans la même optique, la poudre de marbre a été étudiée. Il en ressort qu'il s'agit d'un matériau non pouzzolanique, mais qui joue un rôle crucial en tant que filler (matériau de remplissage). Il contribue à l'amélioration de la compacité et à la réduction de la porosité, ce qui le rend apte à être intégré dans les mélanges cimentaires.

En conclusion, ce chapitre a constitué une base théorique intégrée pour l'étude en présentant les différents concepts liés au mortier et à la valorisation des déchets. Cela ouvre la voie à l'étude expérimentale, qui vise à évaluer l'influence de l'incorporation de la poudre de verre et de marbre sur les propriétés du mortier.

***Chapitr II : Méthodologie de
Formulation et Essais
Expérimentaux***

II.1. Introduction :

L'étude des matériaux constituant le mortier et la caractérisation de leurs propriétés physiques et chimiques représentent une étape cruciale, telle que nous l'avons abordée dans le deuxième chapitre. Sur la base de ces données, ce chapitre est consacré à la détermination de la formulation optimale du mortier, afin d'atteindre un compromis idéal entre une ouvrabilité acceptable et une haute résistance mécanique, en suivant la méthodologie expérimentale adoptée.

II.2. Préparation du mortier :

La quantité de mortier est déterminée conformément à la **norme EN 196-1**. Nous avons utilisé un mélange de mortier considéré comme standard (mortier normalisé), composé des proportions suivantes :

- Une part de ciment (C).
- Trois parts de sable (S).
- Un rapport Eau/Ciment (**E/C**) déterminé en fonction de l'ouvrabilité choisie.

Dans le cadre de notre étude, nous avons utilisé un rapport (E/C) de 0,5. Les essais ont été réalisés sur un total de 195 éprouvettes prismatiques de dimensions (40x40x160) mm. Après le démoulage, ces échantillons ont été conservés dans un milieu aérien.

II.2.1. Procédure de malaxage du mortier :

Le processus de préparation du mélange a été effectué selon les étapes suivantes :

- Préparation des matériaux : Pesage et préparation de tous les constituants nécessaires (ciment, sable et poudres).
- Malaxage à sec : Mélange initial des composants secs, suivi de l'ajout de l'eau avec un malaxage continu pendant 4 minutes jusqu'à l'obtention d'un mortier homogène.
- Répétition du processus : Cette procédure est reconduite pour chaque taux de substitution des poudres (verre et marbre).
- Essai d'ouvrabilité : Réalisation de l'essai d'étalement pour chaque mélange, où nous avons obtenu un diamètre de 14 cm.
- Mise en moule : Remplissage des moules avec le mélange obtenu pour la confection des éprouvettes.

Tableau II-1 Composition du mortier par mètre cube (1 m³)

Composants	Échantillon témoin	%10de poudre	%20de poudre	%30de poudre
Ciment (g)	400	360	320	280
Sable (g)	1200	1200	1200	1200
Eau (g)	200	200	200	200
Poudre (verre,marbe) (g)	\	40	80	120

**Figure II-1 : Dosages des constituants utilisés dans le mélange**

II.3. Essai de maniabilité (Essai d'étalement)

La maniabilité est l'une des propriétés physiques qualitatives essentielles du mortier à l'état frais. Elle représente le moyen de mesurer sa facilité de mise en œuvre. Un mortier normal nécessite une quantité d'eau standard, exprimée par le rapport E/C. Dans les conditions normales, ce rapport avoisine 0,5. Cette propriété est étroitement liée à la finesse des constituants du mélange.

II.3.1. Essai d'étalement selon la norme NBN EN 1015-3 :

Le mortier est placé sur une table à chocs pour observer sa valeur d'étalement. Selon le diamètre obtenu, le mortier est classé en trois catégories :

- Mortier ferme.
- Mortier plastique.
- Mortier très plastique (fluide).

II.3.2. Principe de l'expérience :

Un cône tronqué en acier (dimensions : diamètre inférieur 25 cm, diamètre supérieur 17 cm, et hauteur 12.5cm) est rempli de mortier en deux couches égales. Chaque couche est compactée 10 fois à l'aide d'une tige de piquage. Le moule est ensuite soulevé verticalement, puis on applique une série de 15 secousses (hauteur de chute de 12.5 mm) en 15 secondes. Le diamètre total (D) après étalement est ensuite mesuré [28]

❖ Nous avons réalisé cet essai pour trois rapports eau/ciment (E/C) : 0,5

II.3.3. Description de l'appareil :

L'appareil utilisé pour l'essai de maniabilité est appelé (Table à chocs). Il s'agit d'un dispositif expérimental servant à vérifier la consistance et l'homogénéité du mortier frais en déterminant sa valeur d'étalement. Cet essai permet d'évaluer la fluidité du mélange et d'assurer la stabilité de sa composition après le malaxage [27]



Figure II-2 : Présentation de la table à chocs (Table d'étalement) et mesure de l'ouvrabilité

Tableau II-2 Résultats de l'essai d'étalement et composition des mélanges

Désignation du mélange	Taux de poudre (%)	Rapport E/C	Diamètre d'étalement (cm)
Mortier Témoin	0%	0.5	14.5
Mélange avec poudre	10%	0.5	14.5
Mélange avec poudre	20%	0.5	14.3
Mélange avec poudre	30%	0.5	14.0

Interprétation simplifiée : L'ajout des poudres (verre/marbre) rend le mortier moins fluide. Cela est dû à la finesse de ces matériaux : les grains très fins absorbent plus d'eau pour être mouillés. Comme la quantité d'eau totale reste fixe, le mélange devient plus ferme et sa valeur d'étalement diminue légèrement.

D'après les résultats obtenus lors de l'essai d'étalement, nous constatons que les valeurs de toutes les formulations (Témoin, 10%, 20% et 30%) varient entre 140 mm et 145 mm. Puisque ces valeurs se situent dans la plage comprise entre 140 mm et 200 mm, nous concluons que notre mortier est classé comme un mortier plastique. Cette classification confirme que l'incorporation des poudres conserve une maniabilité optimale et conforme aux exigences de mise en œuvre

II.4. Confection et moulage des éprouvettes :

Dans le cadre de cette étude, un total de 195 éprouvettes prismatiques de dimensions (4 × 4 × 16) cm³ a été confectionné. Le mortier a été préparé avec un rapport E/C = 0,5, sans aucun adjuvant chimique. Le programme expérimental comprend 13 variantes de mélanges : un mélange témoin et douze mélanges incorporant de la poudre de marbre et de la poudre de verre à des taux de substitution de 10%, 20% et 30%. Chaque type de poudre a été testé sous deux formes : brute et traitée thermiquement. Tous les échantillons ont été conservés en milieu aérien sec pour évaluer leur comportement dans ces conditions spécifiques.

Tableau II-3 Taux de substitution du ciment par les poudres utilisées et désignation des mélanges

Nature de la poudre utilisée dans le mélange	verre brut	verre brut	verre brut	verre traité thermiquement	verre traité thermiquement	verre traité thermiquement
Le pourcentage (%)	%10	%20	%30	%10	%20	%30
Désignation (ou Code) du mélange	V _{10%}	V _{20%}	V _{30%}	V _{C10%}	V _{C20%}	V _{C30%}

Nature de la poudre utilisée dans le mélange	Marbre brut	Marbre brut	Marbre brut	Marbre traité thermiquement	Marbre traité thermiquement	Marbre traité thermiquement
Le pourcentage (%)	%10	%20	%30	%10	%20	%30
Désignation (ou Code) du mélange	$M_{10\%}$	$M_{20\%}$	$M_{30\%}$	$Mc_{10\%}$	$Mc_{20\%}$	$Mc_{30\%}$

II.4.1. Étapes de préparation :

- Nettoyage et huilage des moules métalliques.
- Pesage précis des constituants et malaxage à sec avant l'ajout graduel de l'eau.
- Moulage par couches avec un compactage manuel pour l'élimination des vides d'air.
- Arasage des surfaces et maintien en moule pendant environ 24 heures avant le démoulage et le stockage final.



Figure II-3 Constituants du mélange témoin



Figure II-4 Mélange avec 10% de poudre de marbre



Figure II-5 Mélange avec 20% de poudre de marbre



Figure II-6 Mélange avec 30% de poudre de marbre



Figure II-7 Processus de malaxage



Figure II-8 Phase de moulage et compactage



Figure II-9 Éprouvettes prismatiques après démoulage

Les éprouvettes sont laissées à l'air libre, puis le démoulage s'effectue après 24 heures.

II.4.2. Présentation du milieu de conservation (milieu aérien):

L'air est un mélange gazeux naturel, incolore, inodore et insipide, constituant l'atmosphère dans laquelle les éprouvettes ont été conservées. Il est composé principalement d'azote (78 %) et d'oxygène (21 %), avec environ 1 % d'argon ainsi que d'autres gaz présents à l'état de traces. Cette composition demeure relativement stable depuis le niveau de la mer jusqu'à une altitude d'environ 50 km.

Du point de vue physico-chimique, l'air n'est pas une substance pure, mais un mélange homogène de plusieurs gaz. Dans le cadre de cette étude, il représente un milieu de cure à l'air libre, influençant les phénomènes de dessiccation ainsi que le processus de durcissement des éprouvettes de mortier.

II.5. Méthodes d'essais sur les éprouvettes

Les essais réalisés sur le béton se divisent en deux catégories principales : **les essais destructifs** et **les essais non destructifs**.

Les essais destructifs sont ceux qui entraînent la détérioration de la structure interne de l'échantillon. Dans ce cas, les résultats ne peuvent être obtenus qu'après la rupture complète de l'éprouvette. Ces essais sont généralement effectués sur des échantillons normalisés préparés à l'avance selon des conditions bien définies.

En revanche, les essais non destructifs n'endommagent pas totalement l'échantillon. Ils peuvent se limiter à l'examen d'une partie de celui-ci ou être réalisés sans laisser d'effet notable sur sa structure. Ces méthodes permettent d'évaluer les propriétés du béton sans altérer son intégrité.

II.5.1. Les essais non destructifs

II.5.1.1. Mesure du retrait :

La mesure du retrait est effectuée sur des éprouvettes prismatiques de dimensions (4× 4 ×16) cm. Les deux extrémités de l'échantillon sont munies de plots métalliques sur lesquels sont fixées des billes en acier pour faciliter l'opération de mesure. L'éprouvette est placée dans un appareil de mesure numérique de type (Rétrocontrôle), qui calcule la variation de longueur avec une grande précision par rapport à une longueur initiale de référence réglée au préalable. La photo (IV-3) illustre certaines éprouvettes durant l'opération de mesure. Il est à noter que ces essais ont été réalisés conformément à la norme française (**NF P 15-433**) relative à la mesure du retrait des mortiers.

1) But de l'essai

Le but principal de cet essai est de quantifier la stabilité dimensionnelle du mortier au cours du temps lorsqu'il est exposé au milieu extérieur. Plus précisément, il s'agit d'évaluer l'influence de la substitution partielle du ciment par les poudres de marbre et de verre (brutes ou traitées thermiquement) sur le phénomène de retrait linéaire, afin de déterminer si ces ajouts contribuent à réduire ou à accentuer le retrait par rapport au mélange témoin.



Figure II-10 Éprouvettes prismatiques lors de l'essai de retrait

II.5.1.2. Essai de mesure de la vitesse de propagation des ultrasons

Le principe de cet essai non destructif repose sur la mesure du temps de parcours des ondes ultrasonores à travers l'échantillon de mortier, à l'aide de deux transducteurs placés sur ses faces. Une onde impulsionnelle est émise et convertie en signal électrique pour calculer la vitesse de propagation. Cette vitesse fournit un indicateur direct sur l'homogénéité du matériau et la présence de pores ou de défauts internes. Pour assurer une transmission optimale des ondes et éliminer l'air entre la sonde et l'éprouvette, l'utilisation d'un agent de couplage (eau ou gel) est indispensable.

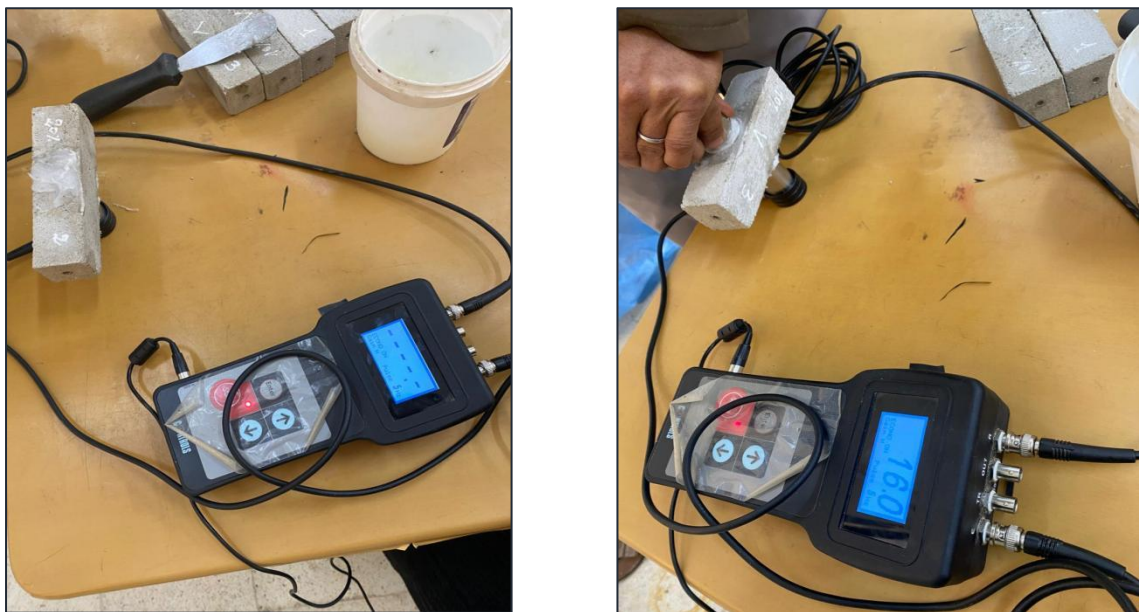


Figure II-11 Essai de mesure de la vitesse des ultrasons

Une fois l'appareil activé, le temps de propagation est mesuré en microsecondes (μs). Il convient de déterminer la distance entre les transducteurs avec une précision de 1% afin de calculer la vitesse de propagation en utilisant l'équation suivante :

$$V = \frac{L}{T}$$

Où :

V : Vitesse de propagation des ultrasons dans le matériau en (m/s).

L : Distance séparant l'émetteur du récepteur en (m).

T : Durée de transmission en (μs).

Le Tableau III-4 présente une classification typique de la qualité du mortier basée sur les mesures de la vitesse d'impulsion ultrasonore. Pour un mélange spécifique, cette relation dépend de l'âge du matériau, des conditions de mûrissement et de la teneur en humidité locale.

II.5.1.3. L'essai d'absorption capillaire

1) But de l'essai d'absorption capillaire

Le but de cet essai est d'évaluer la perméabilité du mortier par capillarité, en mesurant la capacité des éprouvettes à absorber l'eau et à la faire remonter verticalement à travers les pores ouverts au cours du temps. L'importance de ce test réside dans l'étude de l'influence de l'incorporation des poudres de verre et de marbre sur la structure poreuse, afin de déterminer la contribution de ces ajouts à l'amélioration de la durabilité du mortier et à la réduction de sa perméabilité à l'eau.

2) Procédure de l'essai d'absorption capillaire

Pour réaliser l'essai d'absorption capillaire, des éprouvettes prismatiques de dimensions ($4 \times 4 \times 16$) cm³ ont été utilisées. Les étapes suivantes ont été suivies selon les moyens disponibles au laboratoire :

Préparation des échantillons : Les surfaces des éprouvettes ont été nettoyées de la poussière et des résidus de moules pour assurer un contact direct entre l'eau et les pores.

Immersion partielle : Les éprouvettes ont été placées verticalement dans un bac à eau, où le niveau d'eau a été ajusté à une profondeur de 3 mm seulement à partir de la base.

Suivi du poids : L'augmentation de la masse des échantillons a été mesurée au cours du temps suite à la remontée de l'eau par capillarité à des intervalles de temps définis (allant de 10 heures jusqu'à 72 heures).

Calcul des résultats : La différence entre la masse à l'instant (t) et la masse initiale a été utilisée pour calculer le coefficient d'absorption capillaire.



Figure II-12 Immersion partielle des éprouvettes dans le bac d'eau pour l'essai d'absorption capillaire

Le coefficient d'absorption capillaire est déterminé à chaque instant de mesure (t) selon la formule suivante :

$$C_t = \frac{M_t - M_0}{A}$$

Où :

C_t : Valeur du coefficient d'absorption au temps t en (g/cm²).

A : Surface de la section transversale de l'éprouvette (4 × 4) en (cm²).

M_t : Masse de l'échantillon au temps t en (g).

M_0 : Masse initiale de l'échantillon (masse sèche) en (g).

La cinétique d'absorption peut également être exprimée par la sorptivité (S), qui représente le taux d'absorption d'eau entre deux intervalles de temps. Elle est calculée selon la formule suivante :"

$$S = \frac{C_{t_2} - C_{t_1}}{\sqrt{t_2} - \sqrt{t_1}}$$

Où :

S : La sorptivité du matériau.

$C_{t_2} - C_{t_1}$: Les coefficients d'absorption calculés aux instants t_1 et t_2 .

$\sqrt{t_2} - \sqrt{t_1}$: La différence des racines carrées du temps entre deux mesures consécutives.

II.5.2. Les essais destructifs

II.5.2.1. Essai de résistance à la flexion

L'essai de flexion est effectué sur des éprouvettes prismatiques de dimensions (40× 40 × 160) mm. Cette opération est réalisée à l'aide d'une machine de flexion à trois points. L'appareil est équipé de deux supports cylindriques inférieurs fixes, sur lesquels repose l'éprouvette avec un entre-axe de 100 mm, et d'un troisième rouleau supérieur qui applique la charge au milieu de l'éprouvette. La charge est appliquée de manière progressive jusqu'à la rupture, et la valeur de la charge maximale est lue directement sur l'écran de la machine. Cet essai est régi par la norme NF EN 196-1.



Figure II-13 Éprouvette prismatique placée sur la machine d'essai de flexion

L'essai est réalisé à l'aide d'une machine de rupture spécifique à l'essai de flexion sur des éprouvettes de mortier de dimensions (40× 40 × 160) mm. La capacité de charge de cette machine atteint 10 kN, avec une vitesse d'application de la charge d'environ 2.67kN/min.

La résistance à la flexion est calculée par la relation suivante :

$$R_f = \frac{3 l \cdot F_f}{2 b^3}$$

Où :

R_f : Résistance à la flexion (MPa).

F_f : Charge de rupture (N).

l : Distance entre les appuis (mm).

b : Côté de la section carrée (mm).

II.5.2.2. Essai de résistance à la compression

Cet essai est régi par la norme EN 196-1. Il est réalisé à l'aide d'une machine de compression pour matériaux solides sur les demi-prismes obtenus après l'essai de flexion. Ces demi-échantillons, de section (40× 40) mm², sont placés entre deux plaques métalliques rigides de telle sorte que ces dernières se situent à 1 cm des bords latéraux.

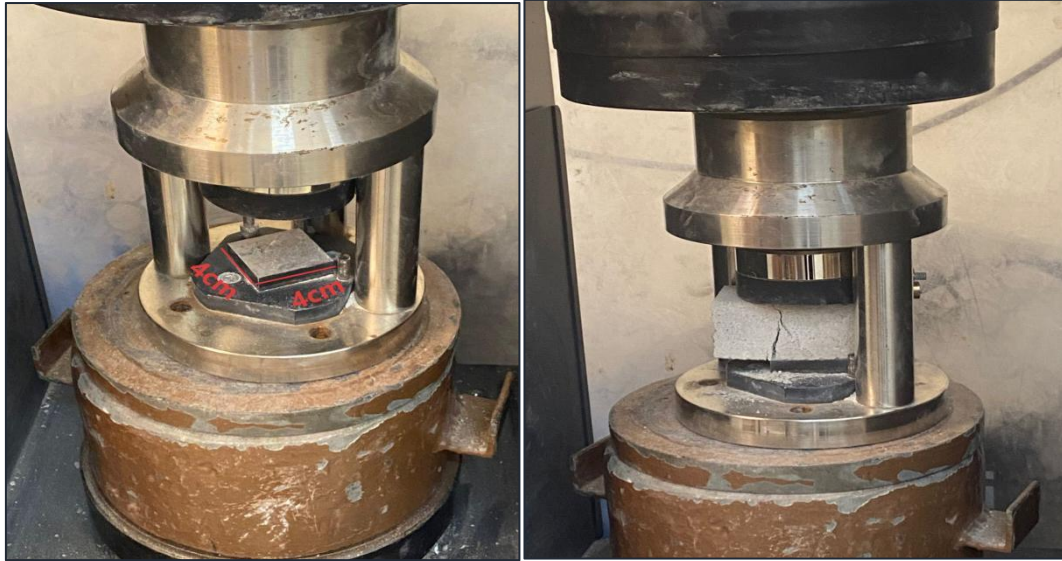


Figure II-14 Réalisation de l'essai de résistance à la compression sur une demi-échantillon

La résistance à la compression est calculée par la relation suivante :

$$R_c = \frac{\sigma_c}{b^2}$$

Où :

R_c : Résistance à la compression en (MPa).

σ_c : Charge maximale de rupture en (N).

b : Dimension du côté de la section (40 mm).

II.6. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté le programme expérimental adopté pour étudier l'effet du remplacement partiel du ciment par la poudre de verre et la poudre de marbre sur les propriétés du mortier, à travers la comparaison de 13 formulations différentes.

- À l'état frais, un essai d'ouvrabilité a été réalisé avec un rapport eau/ciment constant de 0,5, donnant un mortier plastique et facile à mettre en œuvre.
- À l'état durci, les propriétés physiques et mécaniques ont été évaluées à travers les essais suivants : le retrait, l'absorption capillaire, la propagation des ultrasons, ainsi que les essais de flexion et de compression à différents âges (7, 14, 28 et 60 jours).

Chapitre III :
Caractéristiques des
Matériaux Utilisés

III.1. Introduction

Le mortier est l'un des matériaux de construction les plus utilisés et les plus répandus dans le domaine du bâtiment. C'est un mélange constitué essentiellement de sable, d'eau et de ciment, où le ciment joue le rôle de liant qui rassemble les différents composants et leur donne la propriété de cohésion et d'adhérence. En plus de ces composants de base, d'autres matériaux tels que les adjuvants et les plastifiants peuvent être ajoutés dans certains cas, selon la nature de l'utilisation et le but recherché.

Puisque la qualité finale du mortier est directement liée aux caractéristiques de ses matériaux constitutifs et aux proportions adoptées dans le mélange, l'étude précise de ces caractéristiques est une étape fondamentale qui ne peut être ignorée lors de la préparation de tout mélange de mortier, car tout défaut dans ces proportions peut affecter négativement les performances et la résistance du matériau.

En conséquence, ce chapitre traite d'une étude détaillée des caractéristiques des matériaux utilisés dans la composition du mortier faisant l'objet de l'étude, afin de mieux comprendre leur comportement et leur impact sur le mélange final.

III.2. Matériaux utilisés dans l'étude

Dans le cadre de cette étude, les matériaux utilisés ont été choisis avec soin afin d'obtenir des résultats précis et fiables. Nous nous sommes appuyés sur le sable d'El-Oufinar avec sa couleur jaune distinctive, apporté de la carrière de sable de la région de Djamaa dans la wilaya d'El-Oued. Ce type de sable est l'un des types les plus disponibles dans la région, ce qui en fait un choix approprié pour les objectifs de cette recherche.

En ce qui concerne le liant, un ciment Portland composé de type CEM II/A-L 42.5 N a été adopté dans cette étude. C'est l'un des types de ciment les plus utilisés dans les travaux de construction en raison de ses bonnes propriétés mécaniques et de sa pertinence pour diverses applications structurelles, et il se caractérise par des propriétés de haute résistance qui le rendent approprié pour obtenir de bonnes performances mécaniques.

III.2.1. Le Sable

Le sable est obtenu par la désintégration des roches naturelles sous l'effet des facteurs d'érosion tels que le vent et le ruissellement de l'eau, et il peut également être obtenu artificiellement par le concassage de certains matériaux minéraux. Le sable naturel quartzeux et le sable de dune sont utilisés dans la préparation du mortier, à condition qu'ils soient exempts de substances nocives telles que les sels, les acides, les substances alcalines et les

impuretés argileuses et organiques, car le pourcentage de ces impuretés ne doit pas dépasser 3% pour le sable naturel et 5% pour le sable résultant du concassage. Il est défini selon les spécifications standard françaises NF P18-101 et NF P18-301.[4]

Dans le cadre de cette étude, le sable utilisé est extrait naturellement au carrier ou résau d'oued de la région de Djamaa dans la wilaya d'El-Oued au sud de l'Algérie, a été adopté.

III.2.1.1. L'Équivalent de Sable

L'équivalent de sable est l'une des expériences fondamentales réalisées sur le sable, et il est défini selon la norme française **NF P18-598**. Ce test vise à déterminer le pourcentage de matières argileuses et en suspension présentes dans le sable, afin de juger de sa pureté et de sa pertinence pour une utilisation dans la préparation du mortier et du béton.

❖ Principe de l'expérience :

Cette expérience repose sur le lavage d'un échantillon de sable et la détermination du pourcentage d'impuretés présentes, afin d'évaluer sa pertinence pour une utilisation dans les travaux de construction. Cette expérience est réalisée selon la norme française NF P18-598 publiée en octobre 1991.

❖ Matériel utilisé :

- Éprouvettes, en matière plastique, avec 2 traits repères.
- Entonnoir, tamis, spatule, balance, thermomètre, récipients.
- Machine agitatrice électrique ou manuelle.
- Réglet de mesure et piston taré comporte 3 vis formant des butées (masse 1 kg).

❖ Étapes de l'expérience :

- Préparation de la solution distillée et remplissage de l'éprouvette.
- Tamisage d'un échantillon de sable d'un poids de 120 g avec un tamis d'un diamètre de 5 mm pour éliminer le gravier et les impuretés.
- Prendre un poids de 120 g du sable et l'immerger dans la solution distillée.
- Boucher l'éprouvette avec un bouchon en caoutchouc et procéder à l'agitation pendant 40 secondes (environ 90 cycles) par la machine agitatrice.
- Ajuster l'échantillon et le laisser reposer pendant 15 à 20 minutes.
- Mesurer les hauteurs des deux couches formées, où la couche inférieure représente le sable propre par la hauteur h_1 , et la couche supérieure représente le sable avec les impuretés par la hauteur h_2 .
- Nous répétons l'expérience deux fois pour confirmer le résultat.

$$ESV = \frac{h'_2}{h_1} \times 100$$

$$ES = \frac{h_2}{h_1} \times 100$$

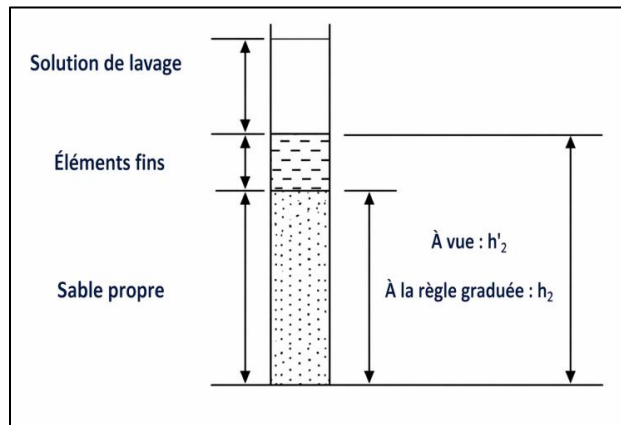


Figure III-1 Éprouvette graduée pour l'essai d'équivalent de sable.

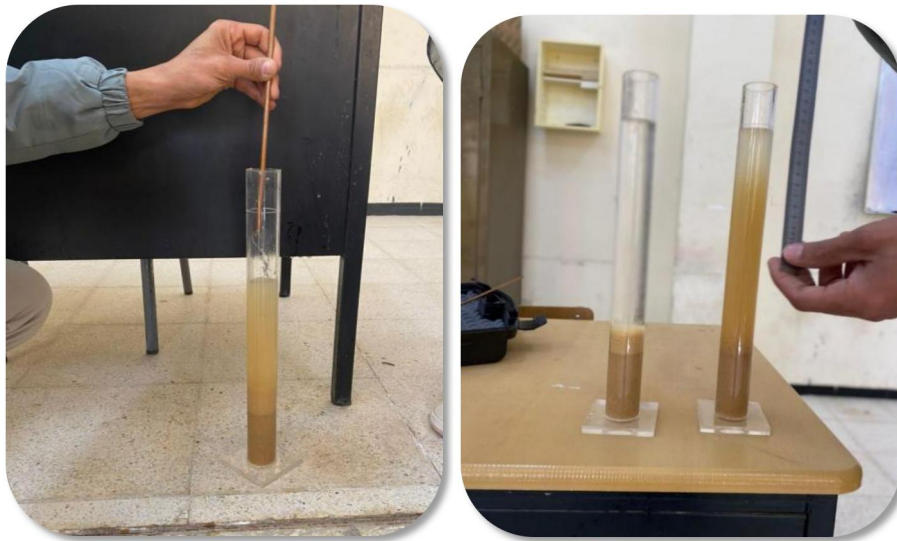


Figure III-2 Essai de l'équivalent de sable



Figure III-3 Machine agitatrice

$h_1 = 11\text{cm}$	$h_1 = 13\text{cm}$
$h'_2 = 8.5\text{cm}$	$h'_2 = 8.7\text{cm}$
$h_2 = 8.3\text{cm}$	$h_2 = 8.5\text{cm}$

$ES_1 = 75\%$ $ESV_1 = 77\%$ $ES_2 = 65\%$ $ESV_2 = 66\%$

Après avoir effectué l'essai, nous avons obtenu les résultats suivants :

À vue d'œil : **$ESV=71.5\%$**

Au piston : **$ES=70\%$**

Tableau III-1 des domaines d'utilisation

Équivalent de sable (Es %)	Type de sable
$Es < 60$	Sable argileux
$60 < Es < 70$	Sable légèrement grossier
$70 < Es < 80$	Sable propre
$Es \geq 80$	Sable très propre

D'après la valeur de l'équivalent de sable (ES) obtenue, le sable utilisé est classé dans la catégorie des sables propres, ce qui indique une faible teneur en impuretés et en matières argileuses. Cela le rend approprié pour la confection du mortier, en assurant un bon compromis entre l'ouvrabilité et la résistance mécanique.

III.2.1.2. Masse volumique

L'essai de masse volumique vise à identifier le type de sable utilisé, à déterminer sa densité et à connaître les volumes et les masses qui entrent dans la composition du mortier. Cet essai est réalisé selon la norme française NF P94-064 publiée en novembre 1993.

III.2.1.1.a. Masse volumique absolue

Elle représente le rapport entre la masse des particules solides et le volume des particules solides, et elle est donnée par la relation :

$$\rho_{ab} = \frac{M_s}{V_s}$$

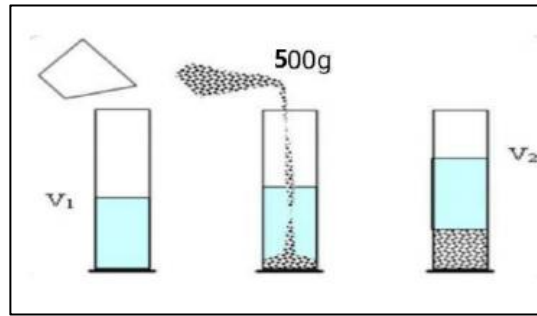


Figure III-4 Essai de Masse volumique absolue

ρ_{ab} : Masse volumique absolue **kg/m³**.

V_S : Volume des particules solides **m³**.

M_S : Masse des particules solides **kg**.

❖ **Matériel utilisé :**

- Éprouvettes graduées en plastique
- Tige d'agitation
- Entonnoir de remplissage
- Balance de portée ≥ 5 kg, précision 1 g
- Bacs en plastique pour la réalisation des essais
- Échantillon de 500 g de sable sec

❖ **Étapes de l'expérience :**

- Mise en place du volume V_1 d'eau dans l'éprouvette.
- Préparation d'une quantité ($M_S = 500\text{g}$) de sable de construction.
- Ajout de la quantité de sable dans l'éprouvette contenant l'eau à l'aide d'un entonnoir.
- Lecture du volume V_2 (volume total du mélange eau et sable).
- Détermination du volume du sable par la relation suivante : $V_S = V_1 - V_2 = 690 - 500 = 190\text{cm}^3$

❖ **Enfin, calcul de la masse volumique absolue par la relation suivante :**

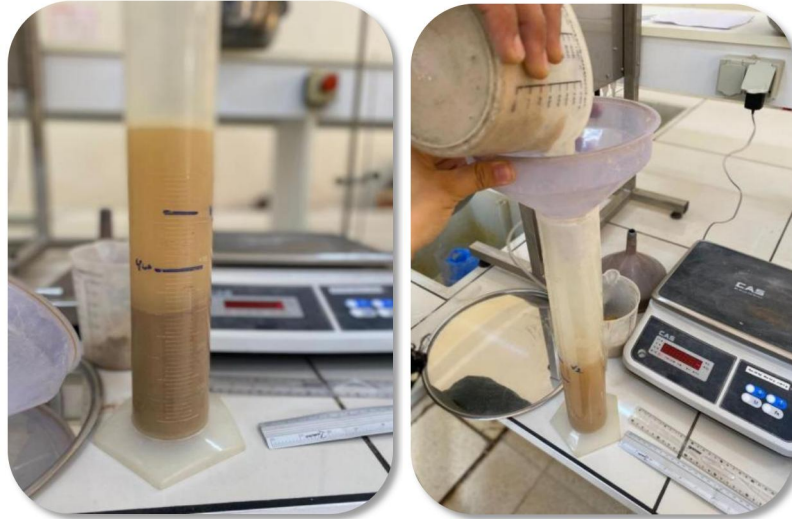


Figure III-5 Essai de Masse volumique absolue

$$M_S = 500\text{g}$$

$$V_S = 190\text{ cm}^3$$

$$\rho_{ab} = 2.63\text{ g/cm}^3.$$

III.2.1.1.b. Masse volumique apparente :

La masse volumique apparente est définie comme le rapport entre la masse totale de l'échantillon et le volume total (volume apparent), et elle est donnée par la relation suivante :

$$\rho_{app} = \frac{M_T}{V_T}$$

ρ_{app} : Masse volumique apparente kg/m^3

V_T : Volume total de l'échantillon m^3

M_T : Masse totale de l'échantillon kg

❖ Matériel utilisé :

- Récipient cylindrique gradué de volume connu
- Règle métallique à araser
- Truelle manuelle pour le remplissage
- Balance de portée $\geq 5\text{ kg}$, précision 1 g
- Bacs en plastique pour la réalisation des essais

❖ Mode opératoire :

- Détermination du volume du récipient : V
- Pesée d'un premier échantillon de sable sec : 300 g
- Pesée d'un second échantillon de sable sec : 500 g

- Placement du récipient gradué à l'intérieur du bac en plastique.
- Versement du sable sec dans le récipient gradué par couches successives sans compactage, en utilisant un entonnoir de laboratoire.
- Arasement de la surface supérieure à l'aide de la règle métallique par un mouvement de va-et-vient.
- Enregistrement des résultats.
- Vidage du sable dans un autre bac en plastique.
- Répétition de l'opération au moins deux (2) fois avec un autre échantillon du même type.



Figure III-6 Essai de la Masse volumique apparente du sable

$$M_{T1} = 300 \text{ g} \quad M_{T2} = 500 \text{ g}$$

$$V_{T1} = 220 \text{ cm}^3 \quad V_{T2} = 380 \text{ cm}^3$$

$$\rho_{app1} = 1.36 \text{ g/cm}^3$$

$$\rho_{app2} = 1.31 \text{ g/cm}^3$$

III.2.1.1.c. Masse volumique des ajouts (poudre de verre et poudre de marbre) :

La même expérience a été répétée sur la poudre de marbre et la poudre de verre, préalablement séchées et tamisées.

II.2.1.1.c.a. Poudre de verre :

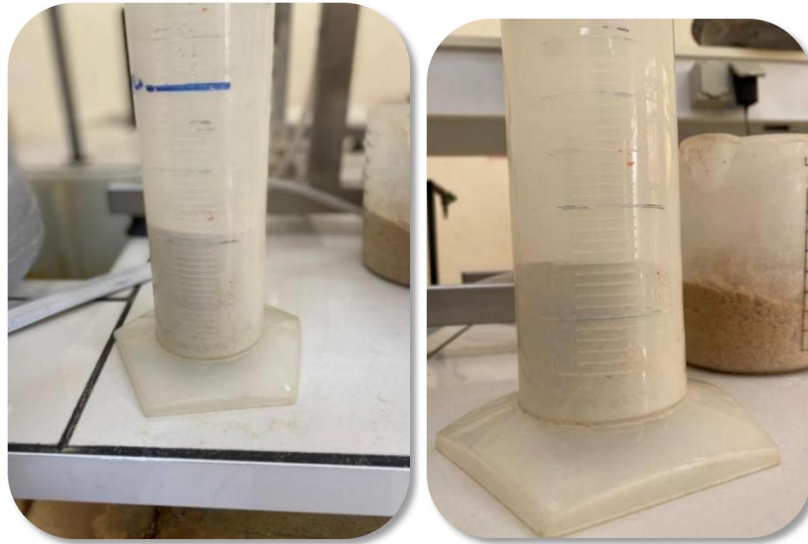


Figure III-7 Essai de Masse volumique apparente de verre

- ❖ Masse volumique absolue du Poudre de verre

$$M_{S1} = 300 \text{ g}$$

$$V_{S1} = 131 \text{ cm}^3$$

$$\rho_{abs1} = 2.29 \text{ g/cm}^3$$

- ❖ Masse volumique apparente de verre

$M_{T1} = 200 \text{ g}$	$M_{T2} = 300 \text{ g}$
$V_{T1} = 150 \text{ cm}^3$	$V_{T2} = 210 \text{ cm}^3$

III.2.1.1.c.b. Poudre de marbre :



Figure III-8 Essai de Masse volumique apparente de marbre

- ❖ Masse volumique absolue du Poudre de marbre

$$M_{S_1} = 300 \text{ g}$$

$$V_{S_1} = 125 \text{ cm}^3$$

$$\rho_{ab_{S_1}} = 2.41$$

$$\rho_{app_1} = 1.33 \text{ g/cm}^3$$

$$\rho_{app_2} = 1.42 \text{ g/cm}^3$$

❖ Masse volumique apparente du Poudre de marbre

$$M_{T_2} = 200 \text{ g}$$

$$M_{T_2} = 200 \text{ g}$$

$$V_{T_2} = 140 \text{ cm}^3$$

$$V_{T_2} = 140 \text{ cm}^3$$

$$\rho_{app_1} = 1.50 \text{ g/cm}^3$$

$$\rho_{app_2} = 1.42 \text{ g/cm}^3$$

Tableau III-2 le Résultats

Masse volumique absolue du sable	$\rho_{ab_s} = 2630 \text{ kg/m}^3$
Masse volumique apparente du sable	$\rho_{app_s} = 1370 \text{ kg/m}^3$
Masse volumique apparente du Poudre de verre	$\rho_{app_v} = 1330 \text{ Kg/m}^3$
Masse volumique absolue du Poudre de verre	$\rho_{ab_v} = 2290 \text{ Kg/m}^3$
Masse volumique apparente du Poudre de marbre	$\rho_{app_M} = 1460 \text{ Kg/m}^3$
Masse volumique absolue du Poudre de marbre	$\rho_{ab_M} = 2410 \text{ Kg/m}^3$

III.2.1.3. D'analyse granulométrique

Cet essai consiste à classer les grains des granulats selon leurs différentes dimensions afin de déterminer la distribution pondérale des tailles de grains au sein de l'échantillon étudié. Cette méthode est réalisée par tamisage : les tamis sont superposés par ordre décroissant de l'ouverture de leurs mailles, le tamis ayant la plus grande ouverture étant placé au sommet.

Cet essai permet de calculer le pourcentage pondéral de chaque fraction granulométrique constituant l'échantillon, offrant ainsi une image précise et globale de sa composition granulaire. Cet essai normalisé est réalisé conformément aux exigences de la norme **NF P 18-560**.

❖ **Étapes de l'essai :**

- **Préparation de l'échantillon :** Préparation de 2kg de sable.
- **Tamissage :** Réalisation du tamisage manuel de l'échantillon de sable mesuré, en utilisant une série de tamis dont les diamètres (ouvertures de mailles) sont les suivants, par ordre décroissant : (5 - 2,5 - 1,25 - 0,63 - 0,315 - 0,16 - 0,08) mm.
- **Pesée des refus :** Mesure de la masse de sable retenue (le refus) dans chaque tamis.



Figure III-9 Série de tamis utilisée

❖ **Matériel utilisé :**

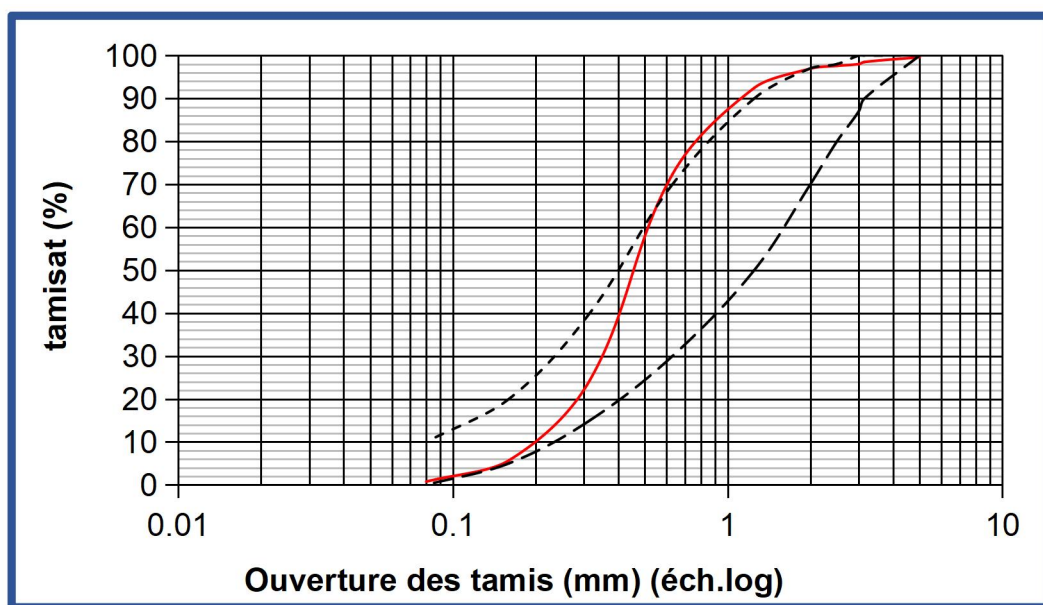
- Série de tamis normalisés : Superposés par ordre décroissant d'ouverture (de la plus grande à la plus petite) : **(5 - 2,5 - 1,25 - 0,63 - 0,315 - 0,16 - 0,08) mm.**
- Couvercle et fond de tamis : Le couvercle pour empêcher la perte de poussière et le fond pour recueillir les particules fines passantes.
- Balance de précision : Pour la pesée de l'échantillon et des refus avec une précision rigoureuse.
- Brosses et pinceaux : Pour nettoyer les mailles des tamis et récupérer les particules coincées après l'essai.
- Récipients de collecte : Pour recueillir et peser séparément les fractions retenues sur chaque tamis
- Échantillon de sable : Une quantité représentative du matériau, séchée et préparée selon les normes en vigueur.



Figure III-10 Essai d'analyse granulométrique

Tableau III-3 des résultats de l'analyse granulométrique

Ouverture des tamis (d)(mm)	Masse des refus simples(g)	Masse des refus cumulés(g)	Pourcentage des refus cumulés (Rc)(%)	Pourcentage des tamisats cumulés (T)(%)
5	8	8	0.4	99.6
2.5	40	48	2.4	97.6
1.25	90	151	7.60	92.45
0.63	317.6	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-11** Courbe granulométrique

III.2.1.4. Module de finesse (M_f)

Le module de finesse est un paramètre numérique qui permet d'évaluer la finesse d'un granulat, en particulier pour le sable. Il est défini comme la somme des pourcentages des refus cumulés sur une série de tamis spécifiés par la norme (0,16 - 0,315 - 0,63 - 1,25 - 2,5 - 5 mm), le tout divisé par 100.

1) Signification technique : Le module de finesse exprime la dimension moyenne des grains du granulat. Bien qu'il donne une indication sur la finesse, il ne reflète pas la continuité

ou l'étendue de la gradation (la répartition granulaire). Il est essentiel pour le calcul de la composition des bétons et mortiers.

2) Domaines de validité pour le sable : Selon la norme NF P 18-540 [4], on distingue trois catégories de sable selon leur module de finesse :

Zone A (Sable préférentiel) : $2,2 < M_f < 2,8$

Ce domaine est recommandé pour l'obtention d'un béton ou d'un mortier avec une bonne maniabilité résistance optimale.

Zone B (Sable à tendance fine) : $1,8 < M_f < 2,2$

Utilisé pour les mortiers fins ou lorsque l'on recherche une grande plasticité, bien que cela puisse nécessiter une augmentation du dosage en eau.

Zone C (Sable à tendance grossière) : $2,8 < M_f < 3,3$

Sable rugueux, utilisé pour les bétons de masse ou pour réduire le retrait, mais il peut donner un mélange moins maniable.

3) Formule de calcul : Le module de finesse de l'échantillon est calculé par la relation suivante :

$$M_f = \frac{\sum R_c}{100}$$

Où :

M_f : Module de finesse.

$\sum R_c$: Somme des pourcentages des refus cumulés sur les tamis de la série normalisée.

Tableau III-4 illustre les résultats du module de finesse

tamis	5	2.5	1.25	0.63	0.315	0.16	$\sum R_c$	M_f
Pourcentage des refus cumulés (R_c) (%)	0.4	2.4	7.60	27.65	75.65	94.3	208	2.08

$$M_f = 2.08$$

✓ **En conclusion, le sable est moyen.**

III.2.2. L'eau :

L'eau potable constitue la référence principale pour la préparation du mortier en raison de sa disponibilité et de sa propreté. Elle doit être exempte de toute impureté susceptible d'affecter les propriétés du mortier, notamment sa résistance mécanique et son adhérence. Dans le mélange, l'eau joue trois rôles essentiels : elle est absorbée en partie par le sable, participe à la réaction d'hydratation du ciment, et assure l'ouvrabilité du mélange. L'eau utilisée dans cette étude est une eau potable ordinaire prélevée du réseau de distribution du département de Génie Civil de l'Université Echahid Hamma Lakhdar, avec un rapport Eau/Ciment fixé à $E/C = 0,5$.

III.2.2.1. Critères de qualité de l'eau de gâchage :

Pour garantir la qualité du mortier, l'eau de gâchage doit être propre et exempte de substances nuisibles telles que les huiles, les sels et les matières organiques. L'eau potable représente le choix idéal, et en cas d'indisponibilité, toute autre source peut être utilisée à condition de respecter les limites d'impuretés fixées par les normes en vigueur. Il est également recommandé d'utiliser en laboratoire la même eau que celle prévue sur chantier, afin de garantir la fiabilité des résultats. [5]

III.2.2.2. L'importance de l'eau dans le mortier :

L'eau joue un rôle fondamental dans la composition du mortier à travers quatre fonctions principales : elle déclenche la réaction d'hydratation du ciment permettant la prise et le durcissement, confère au mélange la plasticité nécessaire à sa mise en œuvre, assure une répartition homogène de la pâte de ciment autour des granulats, et maintient l'hydratation durant la phase de cure pour atteindre la résistance maximale. [5]

III.2.2.3. Le rapport Eau/Ciment (E/C) :

Le rapport E/C constitue le paramètre fondamental qui conditionne la qualité finale du mortier. Un dosage précis est indispensable, car tout excès d'eau augmente la porosité capillaire, affaiblit la cohésion interne et rend le mortier vulnérable au retrait et à la fissuration, réduisant ainsi sa durabilité et sa résistance mécanique. [5]

III.2.3. Le Ciment :

Le ciment est un liant hydraulique essentiel, composé d'une matière inorganique finement broyée qui, mélangée à l'eau, forme une pâte plastique capable de faire prise et de durcir. Ce processus mène à la formation du mortier, un matériau résistant aux agents atmosphériques et aux sollicitations mécaniques.

Le durcissement du ciment résulte principalement des réactions d'hydratation entre l'eau et ses constituants minéralogiques, notamment les silicates de calcium, les aluminates et les

sulfates de calcium. Bien qu'il existe une grande variété de ciments, le Ciment Portland reste le plus répandu et le plus utilisé dans le domaine du génie civil en raison de ses performances mécaniques et de sa durabilité.[6]

Pour cette étude, un ciment Portland composé de type CEM II/A-L 42.5 N a été adopté. Ce type de ciment est l'un des plus couramment utilisés dans les travaux de construction



Figure III-12 illustre les résultats du module de finesse

III.2.3.1. Définition et caractéristiques du ciment utilisé :

Le ciment adopté dans cette étude est un ciment Portland composé de type CEM II/A-L 42.5 N, conforme à la norme NF EN 197-1, caractérisé par une teneur en calcaire comprise entre 6% et 20%. Ce liant se distingue par des performances mécaniques optimales, avec une résistance minimale à la compression de 42,5 MPa à 28 jours et un durcissement régulier (classe N). Il offre une excellente ouvrabilité grâce à la finesse de ses constituants qui agissent comme un effet filler, réduisant ainsi la porosité de la matrice.

III.3. Traitement thermique des poudres d'ajouts (Verre et Marbre)

Le traitement thermique des sous-produits industriels, tels que le verre et le marbre, est une démarche technologique visant à optimiser leur réactivité physico-chimique au sein de la matrice cimentaire. L'objectif principal de l'exposition de ces poudres à une température de 500 °C est d'activer la surface des particules et de stimuler les réactions pouzzolaniques. Ce processus contribue significativement à l'amélioration de la microstructure du mortier et à l'augmentation de sa durabilité.

III.3.1. Poudre de Verre (PV) : Caractérisation physico-chimique et minéralogique

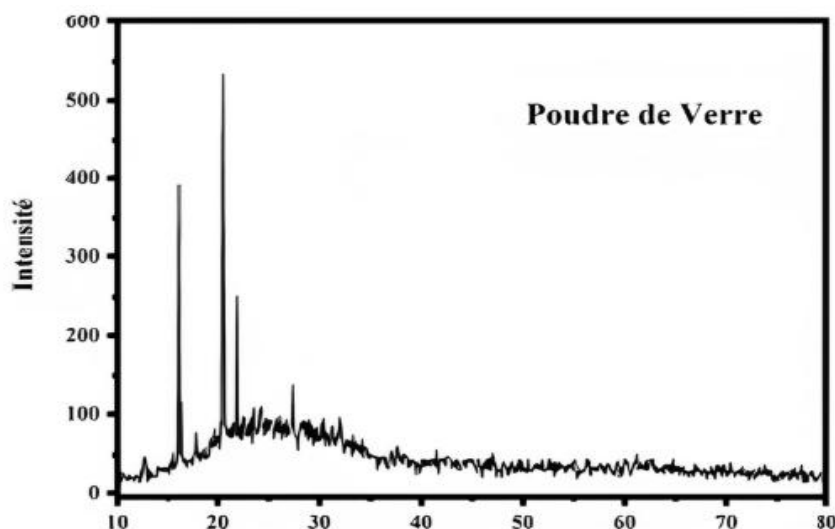


Figure III-13 Diagramme d'analyse de (DRX) sur poudre de verre[27]

Après comparaison et analyse du diagramme ci-dessus, nous avons obtenu les résultats indiqués dans le tableau ci-dessous.[27]

Tableau III-6 Composition chimique du déchet de verre broyé[27]

Nom du composé	Formule chimique	Score
Sodium	Na	58
Oxyde de silicium	Si O ₂	38

La composition chimique de la poudre de verre révèle une dominance du sodium (Na = 58%) et une teneur significative en silice amorphe (SiO₂ = 38%). Cette teneur en SiO₂ sous forme amorphe joue un rôle déterminant dans la réaction pouzzolanique, en réagissant avec la portlandite Ca(OH)₂ libérée lors de l'hydratation du ciment pour former des silicates de calcium hydratés (C-S-H) supplémentaires, ce qui contribue à l'amélioration des propriétés mécaniques et de la durabilité du mortier

III.3.2. Poudre de Marbre (PM) : Caractérisation physico-chimique et minéralogique

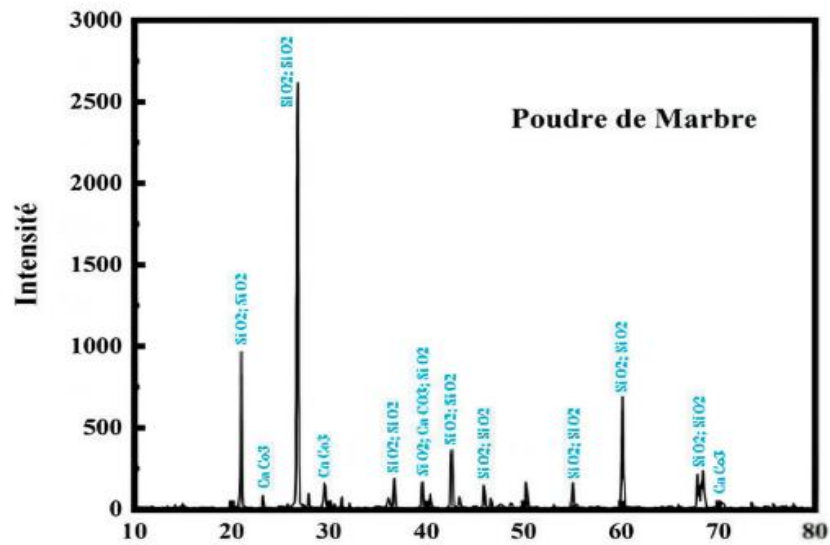


Figure III-14 Diagramme d'analyse de (DRX) sur poudre de marbre[27]

Après comparaison et analyse du diagramme ci-dessus, nous avons obtenu les résultats indiqués dans le tableau ci-dessous.[27]

Tableau III-7 Composition chimique du déchet de marbre broyé[27]

Nom du composé	Formule chimique	Score
Carbonate de calcium	Ca (C O3)	55
Oxyde de calcium	Ca O	19

La composition chimique de la poudre de marbre est dominée par le carbonate de calcium ($\text{CaCO}_3 = 55\%$) et l'oxyde de calcium ($\text{CaO} = 19\%$), ce qui reflète sa nature calcaire. Cette composition lui confère un effet de filler qui améliore la compacité de la matrice cimentaire et favorise une meilleure distribution granulaire. Bien que son activité pouzzolanique soit limitée comparée à la poudre de verre, son incorporation dans le béton contribue à l'amélioration de la maniabilité et à la réduction des vides dans la pâte de ciment.

III.4. Conclusion

À la lumière des résultats expérimentaux obtenus lors de la caractérisation des matériaux de base, les conclusions suivantes peuvent être tirées :

Qualité et propreté du sable : Les essais ont montré que le sable d'El-Oufinar (région de Djamaa) présente des caractéristiques physiques optimales, avec un module de finesse $M_f = 2,08$. Cette valeur, située dans la plage idéale, garantit un excellent compromis entre la résistance mécanique et l'ouvrabilité. Concernant la propreté, les valeurs de l'équivalent de sable ($ES=70\%$ et $ESV=71,5\%$) classent ce matériau dans une catégorie de qualité moyenne et acceptable, apte à la confection d'un mortier stable.

Liant et eau de gâchage : Le choix du ciment s'est porté sur le type CEM II/A-L 42.5 N pour ses performances structurelles reconnues, tandis que l'utilisation d'une eau potable conforme aux exigences d'hydratation assure la régularité des réactions chimiques.

Formulation de référence : Le rapport Eau/Ciment a été rigoureusement fixé à $E/C = 0,5$. Ce dosage servira de base comparative pour analyser l'influence des poudres de verre et de marbre (traitées thermiquement à $500\text{ }^{\circ}\text{C}$) sur les performances finales du mortier étudié.

Chapitre IV : Analyse et discussion des résultats

IV.1. Introduction

Ce chapitre est consacré à la présentation des résultats obtenus à partir des essais réalisés sur le mortier étudié, sous forme de graphiques permettant une lecture et une interprétation claires des données. Dans ce cadre, l'ensemble des propriétés étudiées sera analysé et discuté, aussi bien à l'état frais qu'à l'état durci

Les propriétés étudiées comprennent :

Propriétés physiques : la maniabilité, la propagation des ondes ultrasoniques, l'absorption d'eau par capillarité et le retrait.

Propriétés mécaniques : la résistance à la traction par flexion et la résistance à la compression.

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

Dans un premier temps, les résultats obtenus à l'état frais sont présentés, ces derniers ayant été recueillis immédiatement après l'opération de malaxage, afin de caractériser ce type de mortier. Ces résultats permettent d'étudier les propriétés du mortier à l'état frais, notamment l'influence des poudres ajoutées sur le rapport eau/ciment E/C.

IV.2.1. Résultats de la maniabilité (étalement)

Les résultats de l'essai d'étalement des mélanges étudiés sont présentés dans le **Tableau II-2** ci-dessous, avec différents taux de substitution de poudres et un rapport eau/ciment fixe égal à **0.5**

Il ressort des résultats obtenus que les valeurs d'étalement de tous les mélanges varient entre 140 mm et 145 mm, ces valeurs se situant dans la plage acceptable comprise entre 140 mm et 200 mm, ce qui classe ces mélanges dans la catégorie des **mortiers plastiques**.

On observe également que la valeur d'étalement diminue progressivement avec l'augmentation du taux de poudre, passant de 14.5 cm pour le mélange témoin à 14.0 cm pour un taux de substitution de 30%. Cette diminution s'explique par plusieurs raisons, dont la principale est que les poudres fines, telles que la poudre de verre et la poudre de marbre, présentent une surface spécifique beaucoup plus grande que le ciment qu'elles remplacent, ce qui les amène à absorber de plus grandes quantités d'eau pour mouiller leurs grains. Étant donné que la quantité totale d'eau reste constante dans tous les mélanges, l'eau disponible pour la maniabilité diminue progressivement à mesure que le taux de poudre augmente, ce qui se répercute directement sur la fluidité du mélange et le rend plus ferme et moins étalé.

Cependant, cette diminution reste légère et n'affecte pas négativement la maniabilité du mortier, car tous les mélanges ont maintenu une maniabilité acceptable et conforme aux exigences d'utilisation.

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

Cette partie présente les résultats obtenus à l'état durci, mesurés après les périodes de cure définies, afin d'évaluer l'influence des poudres ajoutées sur les propriétés physiques et mécaniques du mortier dans son état final.

Après 24 heures du coulage des différents échantillons, le démoulage a été effectué, puis les éprouvettes ont été conservées à l'air. Les essais de traction par flexion et de compression ont été réalisés aux échéances suivantes : 7, 14, 28 et 60 jours, tandis que l'essai de propagation des ondes ultrasoniques a été effectué aux échéances : 7, 14 et 28 jours. Quant à l'essai d'absorption d'eau par capillarité, il a été réalisé après 28 jours de conservation.

En ce qui concerne la mesure du retrait des éprouvettes, elle a été effectuée à des intervalles successifs : 1, 2, 3, 7, 14 et 28 jours, ce qui permet de suivre l'évolution du retrait dans le temps de manière précise.

L'ensemble de ces résultats permet d'étudier l'évolution des propriétés du mortier et l'influence des taux de substitution et du traitement thermique sur ses performances physiques et mécaniques.

IV.3.1. Essai de mesure du retrait :

Le retrait est défini comme le phénomène de réduction de volume qui se produit dans les matériaux cimentaires au cours des phases de séchage et de durcissement. Ce phénomène est influencé par plusieurs facteurs, notamment le rapport eau/ciment E/C, le type de ciment utilisé, ainsi que le taux de substitution des poudres ajoutées telles que la poudre de verre et la poudre de marbre.

Dans le cadre de cette étude, le retrait des éprouvettes de mortier préparées avec différents taux de substitution (0%, 10%, 20%, 30%) a été mesuré à des intervalles successifs : 1, 2, 3, 7, 14 et 28 jours, afin de suivre l'évolution du retrait dans le temps et d'étudier l'influence de ces poudres sur le comportement du mortier à l'état durci.

Les résultats obtenus dans le cadre de notre étude sont présentés ci-après :

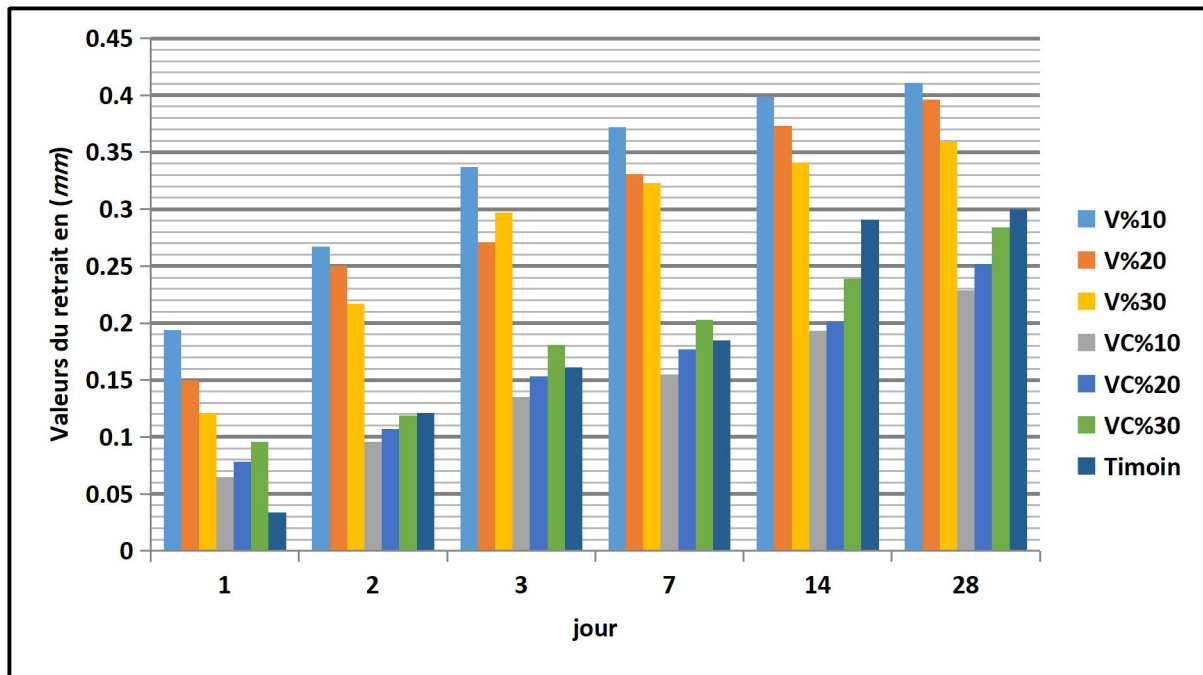


Figure IV-1 Évolution du retrait des mortiers contenant de la poudre de verre en fonction du temps.

IV.3.1.1. Analyse et discussion des résultats du retrait des mélanges contenant de la poudre de verre :

La figure illustre l'évolution du retrait des mélanges contenant de la poudre de verre traitée et non traitée avec différents taux de substitution (10%, 20% et 30%) par rapport au mélange de référence, durant les âges de cure de 1, 2, 3, 7, 14 et 28 jours.

Les résultats montrent que les valeurs du retrait pour l'ensemble des mélanges augmentent progressivement avec l'âge de cure, ce qui est dû à la perte continue de l'eau interne et au développement de la microstructure du mortier au fil du temps.

- À l'âge d'un jour, les mélanges contenant de la poudre de verre non traitée ont enregistré des valeurs plus élevées, variant entre **0,12mm** et **0,19mm**, tandis que les mélanges traités thermiquement ont affiché des valeurs plus faibles, comprises entre **0,08mm** et **0,10mm**, par rapport au mélange de référence estimé à environ **0,03mm**.
- Aux âges de 2 et 3 jours, les valeurs du retrait ont continué de croître pour tous les mélanges ; les mélanges V 10% et V 20% ont enregistré les valeurs les plus élevées, alors que les mélanges traités VC ont maintenu des valeurs plus faibles et plus proches de celles du mélange de référence.
- À 7 et 14 jours, les valeurs du retrait ont augmenté de manière significative. Le mélange V 10% a enregistré les valeurs les plus hautes avec environ **0,39mm** et

0,41mm respectivement, tandis que les mélanges VC 10% et VC 20% ont montré des valeurs inférieures à celles des mélanges non traités.

- À l'âge de 28 jours, tous les mélanges ont atteint leurs valeurs de retrait les plus élevées, soit environ **0,41mm** pour le mélange V 10%. En revanche, les mélanges traités thermiquement ont enregistré des valeurs oscillantes entre **0,23mm** et **0,28mm**, ce qui est plus proche du mélange de référence estimé à environ **0,30mm**.

Nous concluons que l'utilisation de la poudre de verre traitée thermiquement contribue à réduire le retrait par rapport au verre non traité, particulièrement à de faibles taux de substitution, ce qui permet d'améliorer la stabilité du mortier et de limiter les déformations au cours du temps.

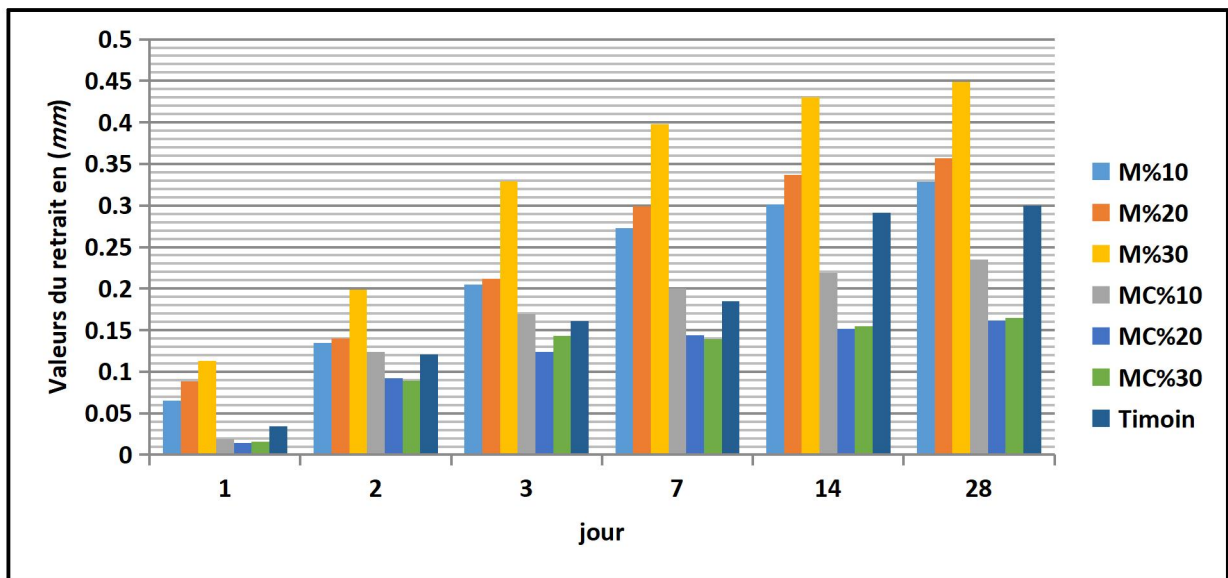


Figure IV-2 Évolution du retrait des mortiers contenant de la poudre de marbre en fonction du temps

IV.3.1.2. Analyse et discussion des résultats du retrait des mélanges contenant de la poudre de marbre :

La figure illustre l'évolution du retrait des mélanges contenant de la poudre de marbre traitée et non traitée avec différents taux de substitution (10%, 20% et 30%) par rapport au mélange de référence, durant les âges de cure de 1, 2, 3, 7, 14 et 28 jours.

Les résultats montrent que les valeurs du retrait pour l'ensemble des mélanges augmentent progressivement avec l'âge de cure, en raison de la perte continue de l'eau interne et du développement de la microstructure du mortier au fil du temps.

- À l'âge d'un jour, tous les mélanges ont enregistré des valeurs faibles variant entre **0,01mm** et **0,11mm**. Les mélanges traités thermiquement (MC) ont affiché les valeurs

les plus basses par rapport aux mélanges non traités, tandis que le mélange de référence se situait aux alentours de **0,03mm**.

- Aux âges de 2 et 3 jours, les valeurs du retrait ont augmenté graduellement ; le mélange M 30% a enregistré les valeurs les plus élevées avec environ **0,20mm** et **0,33mm** respectivement, alors que les mélanges traités MC ont maintenu des valeurs inférieures et plus proches de celles du mélange de référence.
- À 7 et 14 jours, le retrait s'est accentué de manière claire pour tous les mélanges. Le mélange M 30% a enregistré les valeurs les plus hautes avec environ **0,39mm** et **0,43mm** respectivement, tandis que les mélanges MC 20% et MC 30% ont montré les valeurs les plus faibles par rapport aux autres compositions.
- À l'âge de 28 jours, les valeurs du retrait ont atteint leurs niveaux maximaux. Le mélange M 30% a enregistré la valeur la plus élevée avec environ **0,45mm**, suivi de M 20% et M 10%. En revanche, les valeurs des mélanges traités thermiquement ont oscillé entre **0,16mm** et **0,24mm**, ce qui est inférieur au mélange de référence estimé à environ **0,30mm**.

Nous concluons que l'utilisation de la poudre de marbre traitée thermiquement contribue à réduire le retrait par rapport au marbre non traité, particulièrement aux taux de substitution faibles et modérés, ce qui améliore la stabilité du mortier et limite les déformations avec l'âge de cure.

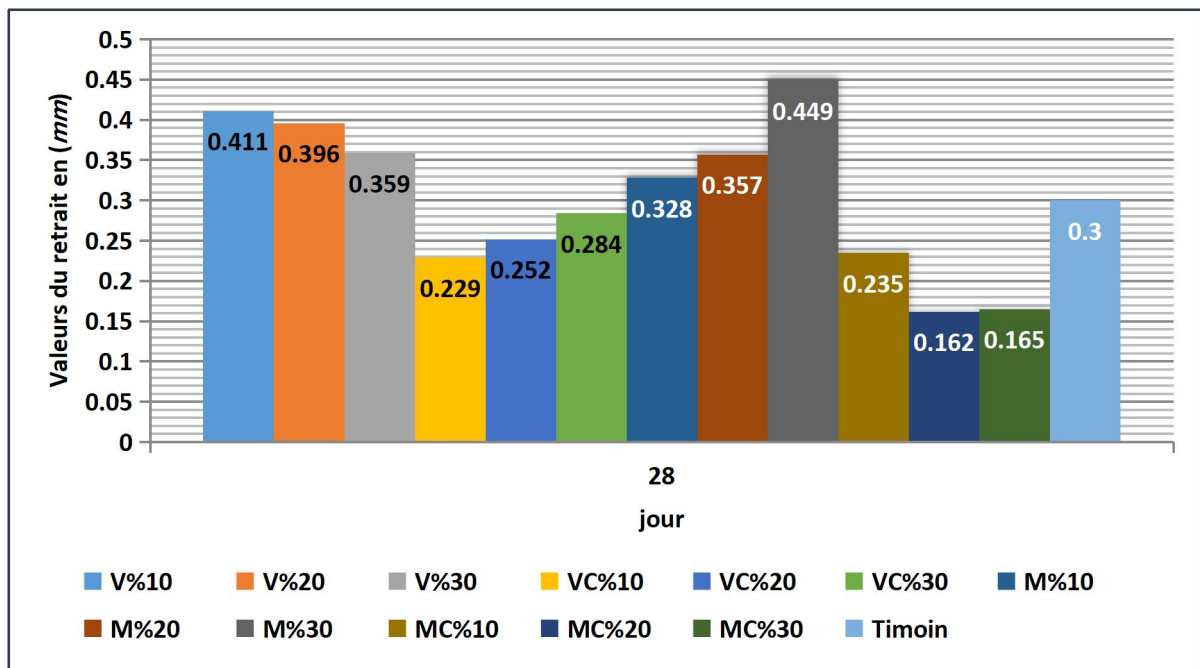


Figure IV-3 Comparaison des valeurs du retrait des différents mélanges à 28 jours.

IV.3.1.3. Analyse comparative des résultats du retrait des différents mélanges :

Le graphique comparatif illustre les valeurs du retrait de l'ensemble des mélanges étudiés au vingt-huitième jour. Ce stade a été adopté comme référence pour la comparaison finale car il représente l'étape où le mortier atteint sa maturité et sa stabilité mécanique maximale.

D'après les résultats enregistrés, nous observons une différence nette entre les mélanges contenant de la poudre de verre et ceux à base de marbre, particulièrement entre les matériaux traités et non traités thermiquement. Le mélange M 30% a enregistré la valeur de retrait la plus élevée avec environ **0,449mm**, suivi des mélanges V 10% et V 20% avec des valeurs respectives d'environ **0,411mm** et **0,396mm** ; des valeurs qui restent supérieures à celle du mélange de référence estimée à **0,30mm**.

En revanche, les mélanges traités thermiquement ont affiché les valeurs de retrait les plus faibles par rapport aux mélanges non traités. Le mélange VC 10% a enregistré la valeur la plus basse avec environ **0,229mm**, tandis que les mélanges MC 20% et MC 30% ont présenté des valeurs faibles et convergentes d'environ **0,162mm** et **0,165mm** respectivement.

❖ Interprétation des résultats:

- La réduction marquée du retrait pour les mélanges traités thermiquement s'explique par l'amélioration de la structure interne du mortier, résultant d'une meilleure distribution des fines particules et d'une réduction des vides capillaires. Cela limite la perte d'eau interne et réduit les déformations volumétriques au fil du temps. De plus, le traitement thermique a contribué à stabiliser les ajouts et à atténuer leur impact négatif sur l'équilibre de la pâte cimentaire.
- Quant aux mélanges non traités, notamment aux taux de substitution élevés, l'augmentation du retrait est due à la hausse de la porosité et à la faible cohésion de la structure interne consécutive à la diminution de la quantité de ciment effectif dans le mélange, ce qui accroît la sensibilité du mortier à la dessiccation et aux déformations.
- Nous concluons que le traitement thermique, tant pour la poudre de verre que pour celle du marbre, a clairement contribué à réduire le retrait et à améliorer la stabilité du mortier, particulièrement pour les taux de substitution faibles et modérés, comparativement aux mélanges non traités.

IV.3.2. Essai d'absorption d'eau par capillarité :

L'essai d'absorption d'eau par capillarité est l'un des essais physiques fondamentaux qui permet d'évaluer la résistance du mortier à la pénétration de l'eau à travers son réseau de pores internes. Ce phénomène repose sur la capacité du matériau à absorber l'eau sous l'effet des

forces de tension superficielle, sans aucune pression extérieure, ce qui en fait un indicateur important de la durabilité du mortier et de sa résistance aux agents environnementaux.

La capacité d'absorption capillaire est influencée par plusieurs facteurs, notamment la taille des pores et leur interconnexion, la nature des matériaux constituant le mélange, ainsi que le taux de substitution des poudres ajoutées telles que la poudre de verre et la poudre de marbre.

Dans le cadre de cette étude, l'absorption d'eau des éprouvettes de mortier préparées avec différents taux de substitution (0%, 10%, 20%, 30%) a été mesurée à des intervalles de temps successifs : 0, 15, 30, 60, 120, 240, 480 et 1440 minutes, afin d'étudier l'influence de ces poudres et du traitement thermique sur la perméabilité du mortier.

Les résultats obtenus dans le cadre de notre étude sont présentés ci-après :

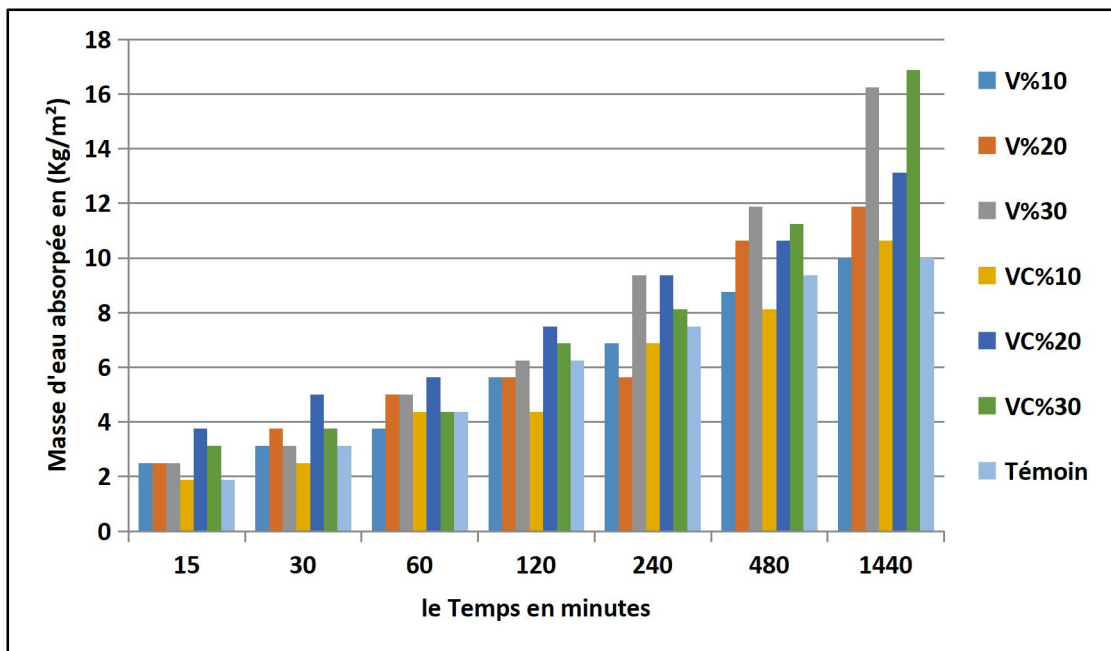


Figure IV-4 Évolution de l'absorption capillaire d'eau des mortiers contenant de la poudre de verre en fonction du temps.

Avec les mêmes données, en fonction de la masse d'eau absorbée en Kg/m^2 et de la racine carrée du temps ($\text{s}^{1/2}$), cela donne la courbe graphique suivante :

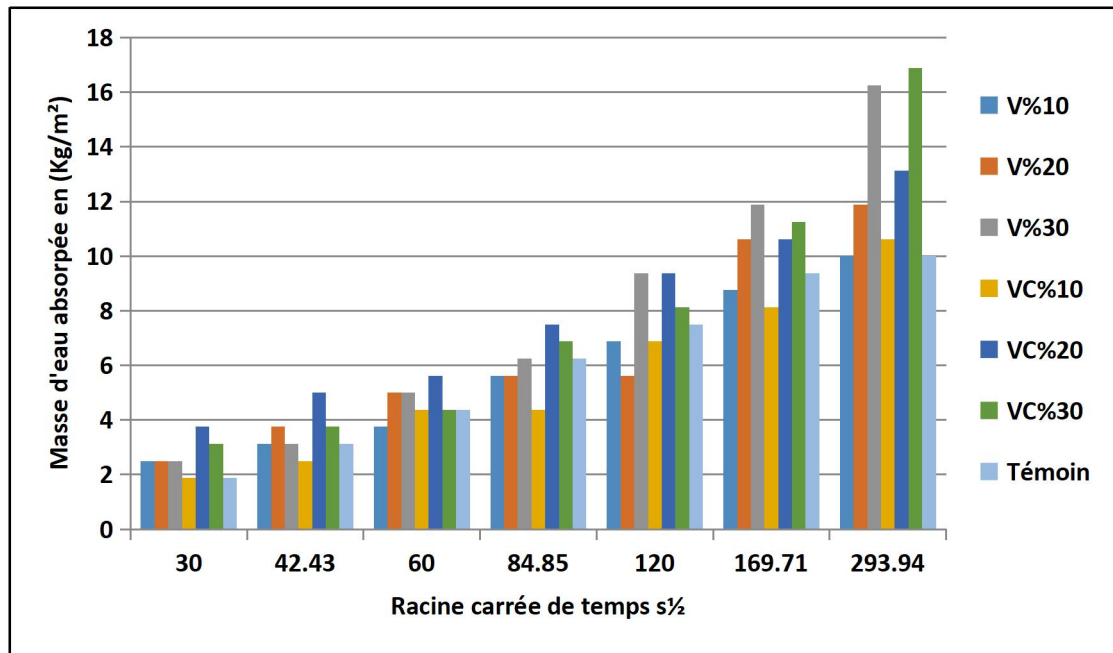


Figure IV-5 · Évolution de l'absorption capillaire des mélanges contenant de la poudre de verre en fonction de la racine carrée du temps ·

IV.3.2.1. Analyse et discussion des résultats de l'absorption capillaire des mélanges contenant de la poudre de verre :

La figure illustre l'évolution de la masse d'eau absorbée par capillarité des mélanges contenant de la poudre de verre traitée et non traitée avec différents taux de substitution (%10, %20 et %30) par rapport au mélange témoin, en fonction de la racine carrée du temps.

Les résultats montrent que toutes les formulations enregistrent une augmentation progressive de la quantité d'eau absorbée avec l'augmentation de la racine carrée du temps, ce qui traduit la poursuite du transfert de l'eau à travers les pores sous l'effet de la capillarité.

- Au début de l'essai ($\sqrt{t}=30 \text{ s}^{1/2}$), les différentes formulations présentent des valeurs relativement proches comprises entre **1.81** et **3.7 Kg/m²**. Les mélanges ayant des taux de substitution élevés enregistrent les valeurs d'absorption les plus importantes, tandis que le mélange témoin et le mélange VC%10 présentent les valeurs les plus faibles.
- Avec l'augmentation du temps jusqu'à ($\sqrt{t}=60 \text{ s}^{1/2}$), les valeurs d'absorption augmentent progressivement pour l'ensemble des mélanges, tout en maintenant des valeurs plus proches du témoin pour les mélanges à faibles taux de substitution.
- À ($\sqrt{t}=120 \text{ s}^{1/2}$), une augmentation notable de l'absorption est observée pour toutes les formulations. Les mélanges V%30, VC%20 et VC%30 enregistrent les valeurs les plus élevées, tandis que les mélanges V%10 et VC%10 conservent des valeurs d'absorption relativement plus faibles par rapport aux autres formulations.

- À la fin de l'essai ($\sqrt{t}=293.94 \text{ s}^{1/2}$), les valeurs d'absorption varient entre **10** et **16.8 Kg/m²**. Les mélanges à taux de substitution élevés présentent les valeurs d'absorption les plus importantes, alors que les mélanges V%10 et VC%10 montrent des résultats plus proches du mélange témoin.

La représentation en fonction de la racine carrée du temps montre une relation quasi linéaire durant la phase initiale, ce qui indique que le transfert de l'eau s'effectue principalement sous l'effet de la capillarité. Les résultats indiquent également que les meilleures performances sont obtenues avec un taux de substitution de %10, aussi bien pour la poudre de verre traitée thermiquement que non traitée, ces mélanges présentant une absorption capillaire plus faible et un comportement plus proche du mélange témoin par rapport aux autres taux de substitution.

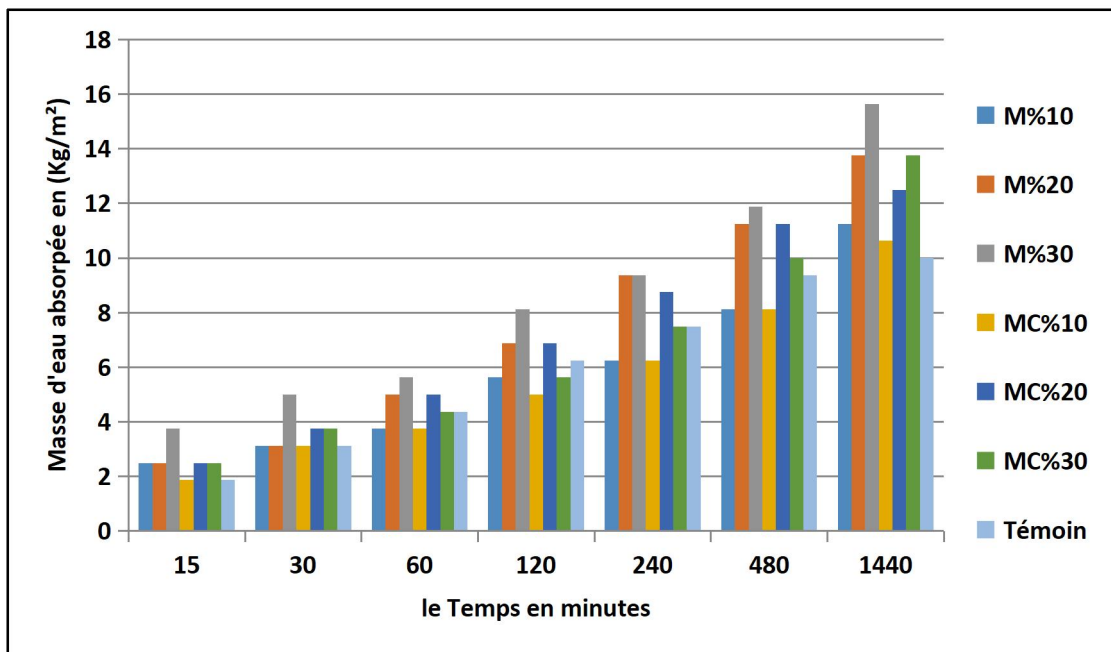


Figure IV-6 Évolution de l'absorption capillaire d'eau des mortiers contenant de la poudre de marbre en fonction du temps.

Avec les mêmes données, en fonction de la masse d'eau absorbée en Kg/m² et de la racine carrée du temps ($\text{s}^{1/2}$), cela donne la courbe graphique suivante :

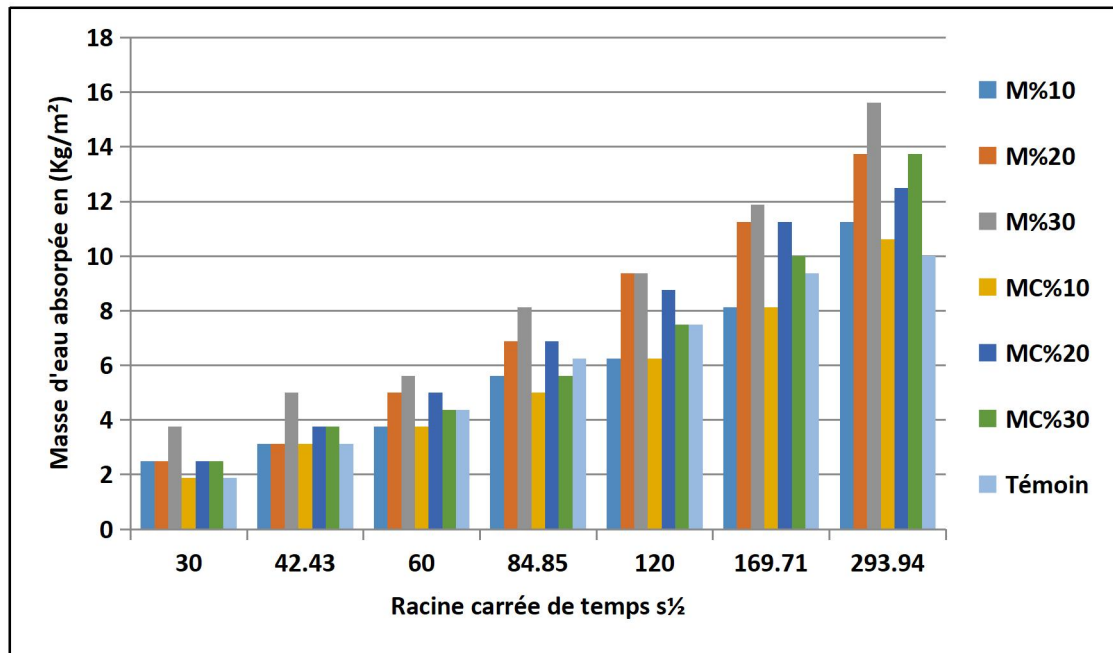


Figure IV-7 Évolution de l'absorption capillaire des mélanges contenant de la poudre de marbre en fonction de la racine carrée du temps .

IV.3.2.2. Analyse et discussion des résultats de l'absorption capillaire des mélanges contenant de la poudre de marbre :

La figure illustre l'évolution de la masse d'eau absorbée par capillarité des mélanges contenant de la poudre de marbre traitée et non traitée avec différents taux de substitution (%10, %20 et %30) par rapport au mélange témoin, en fonction de la racine carrée du temps.

Les résultats montrent que toutes les formulations enregistrent une augmentation progressive de la quantité d'eau absorbée avec l'augmentation de la racine carrée du temps, ce qui traduit la poursuite du transfert de l'eau à travers les pores sous l'effet de la capillarité.

- Au début de l'essai ($\sqrt{t}=30 \text{ s}^{1/2}$), les différentes formulations présentent des valeurs relativement proches comprises entre **1.8** et **3.7 Kg/m²**. Les mélanges ayant des taux de substitution élevés enregistrent les valeurs d'absorption les plus importantes, tandis que le mélange témoin et le mélange MC%10 présentent les valeurs les plus faibles.
- Avec l'augmentation du temps jusqu'à ($\sqrt{t}=60 \text{ s}^{1/2}$), les valeurs d'absorption augmentent progressivement pour l'ensemble des mélanges, tout en maintenant des valeurs plus proches du témoin pour les mélanges à faibles taux de substitution.
- À ($\sqrt{t}=120 \text{ s}^{1/2}$), une augmentation notable de l'absorption est observée pour toutes les formulations. Les mélanges M%20 et M%30 enregistrent les valeurs les plus

élevées, tandis que les mélanges M%10 et MC%10 conservent des valeurs d'absorption relativement plus faibles par rapport aux autres formulations.

- À la fin de l'essai ($\sqrt{t}=293.94 \text{ s}^{1/2}$), les valeurs d'absorption varient entre **10** et **15.6 Kg/m²**. Les mélanges à taux de substitution élevés présentent les valeurs d'absorption les plus importantes, alors que les mélanges M%10 et MC%10 montrent des résultats plus proches du mélange témoin.

La représentation en fonction de la racine carrée du temps montre une relation quasi linéaire durant la phase initiale, ce qui indique que le transfert de l'eau s'effectue principalement sous l'effet de la capillarité. Les résultats indiquent également que les meilleures performances sont obtenues avec un taux de substitution de %10, aussi bien pour la poudre de marbre traitée thermiquement que non traitée, ces mélanges présentant une absorption capillaire plus faible et un comportement plus proche du mélange témoin par rapport aux autres taux de substitution.

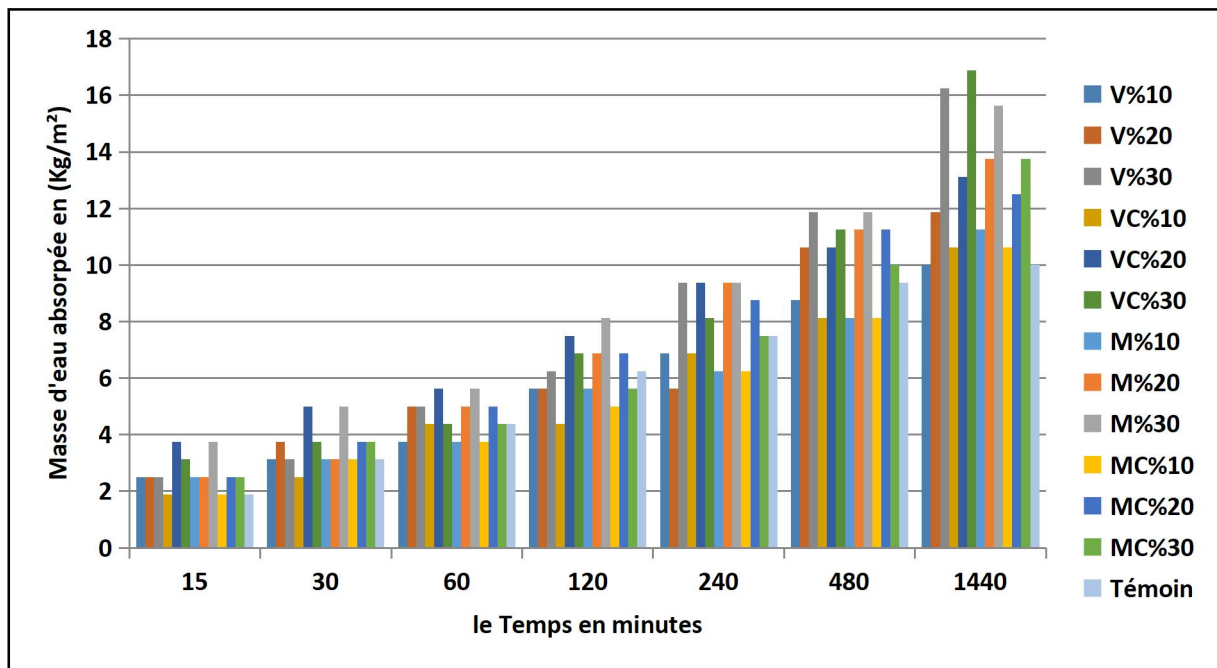


Figure IV-8 Comparaison de l'absorption capillaire des différents mélanges après immersion.

Avec les mêmes données, en fonction de la masse d'eau absorbée en Kg/m² et de la racine carrée du temps ($s^{1/2}$), cela donne la courbe graphique suivante :

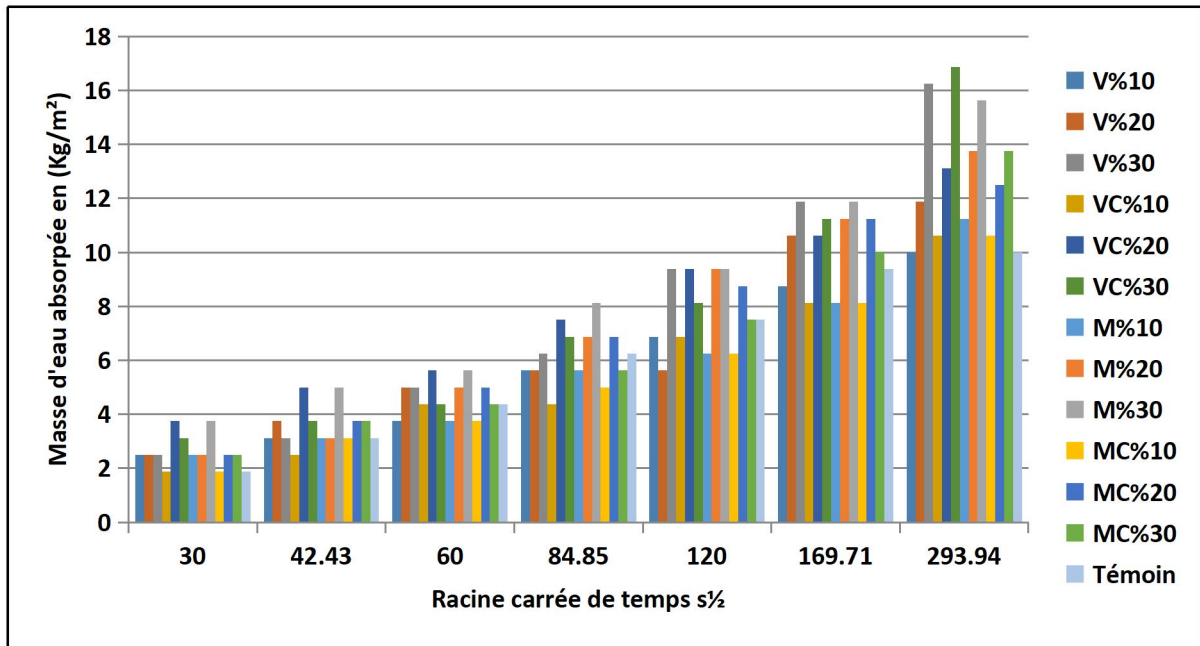


Figure IV-9 Comparaison de l'absorption capillaire des différents mélanges en fonction de la racine carrée du temps.

IV.3.2.3. Analyse comparative des résultats de l'absorption capillaire des différents mélanges :

La figure comparative illustre l'évolution de l'absorption capillaire des différents mélanges étudiés contenant de la poudre de verre et de la poudre de marbre, traitées et non traitées, avec différents taux de substitution (%10, %20 et %30) par rapport au mélange témoin, en fonction de la racine carrée du temps. Cette représentation permet de mettre en évidence le comportement du transfert de l'eau à l'intérieur de la structure poreuse du mortier ainsi que l'influence du type de matériau ajouté et du traitement thermique sur l'absorption capillaire.

D'après les résultats obtenus, on remarque que tous les mélanges présentent une augmentation progressive de la quantité d'eau absorbée avec l'augmentation de la racine carrée du temps, ce qui traduit la poursuite du transfert de l'eau à travers les pores capillaires du mortier. Les résultats montrent également que les mélanges à taux de substitution élevés (%30) enregistrent les valeurs d'absorption les plus importantes, notamment les mélanges VC%30 et M%30.

Le mélange VC%30 enregistre la valeur d'absorption capillaire la plus élevée à la fin de l'essai avec environ **16.8 Kg/m²**, suivi du mélange V%30 avec environ **16.2 Kg/m²**, tandis que le mélange témoin présente la valeur la plus faible estimée à environ 10 Kg/m². En

revanche, les mélanges à faible taux de substitution (%10), notamment VC%10 et MC%10, montrent des résultats plus proches du mélange témoin par rapport aux autres formulations.

❖ **Interprétation des résultats:**

- Les bonnes performances des mélanges à faibles taux de substitution s'expliquent par l'amélioration du compactage de la matrice cimentaire grâce à l'effet de remplissage assuré par les fines particules de poudre de verre et de marbre, ce qui contribue à réduire le volume des vides et des pores capillaires. De plus, la poudre de verre traitée thermiquement présente une activité pouzzolanique favorisant la formation d'une quantité supplémentaire de gel C-S-H, améliorant ainsi la cohésion de la structure interne et limitant le transfert de l'eau.
- Concernant les mélanges à taux de substitution élevés (%30), l'augmentation de la quantité de matériau substitué au détriment du ciment entraîne une hausse de la porosité et une diminution de la densité de la structure interne, ce qui facilite le transfert de l'eau à travers les pores capillaires et augmente les valeurs d'absorption.
- Nous concluons que les meilleures performances vis-à-vis de la résistance à l'absorption capillaire sont obtenues avec un taux de substitution de %10 pour la poudre de verre et la poudre de marbre, particulièrement pour les mélanges traités thermiquement, ces formulations présentant un comportement plus proche du mélange témoin ainsi qu'une structure interne plus homogène et moins poreuse par rapport aux autres taux de substitution.

IV.3.3. Essai de vitesse de propagation des ultrasons :

L'essai de propagation des ondes ultrasoniques est l'un des essais non destructifs les plus utilisés dans le domaine de l'évaluation de la qualité des matériaux cimentaires, car il permet d'étudier la structure interne du mortier sans endommager l'éprouvette. Cet essai repose sur la mesure de la vitesse de propagation des ondes ultrasoniques à travers l'éprouvette, cette vitesse étant directement liée à la densité du matériau et à son degré de cohésion interne. En effet, plus la structure interne du mortier est dense et homogène, plus la vitesse de propagation des ondes est élevée.

La vitesse de propagation des ondes ultrasoniques est influencée par plusieurs facteurs, notamment le taux de porosité du mortier, la nature des matériaux constituant le mélange, ainsi que le taux de substitution des poudres ajoutées telles que la poudre de verre et la poudre de marbre, sans oublier le traitement thermique qui peut modifier la nature de la structure interne du matériau.

Dans le cadre de cette étude, la vitesse de propagation des ondes ultrasoniques des éprouvettes de mortier préparées avec différents taux de substitution (0%, 10%, 20%, 30%) a été mesurée aux échéances de 7, 14 et 28 jours en adoptant la méthode directe, qui consiste à placer l'émetteur et le récepteur sur les deux faces opposées de l'éprouvette, afin de suivre l'évolution de la structure interne du mortier dans le temps et d'étudier l'influence des poudres ajoutées et du traitement thermique sur sa qualité.

Les résultats obtenus dans le cadre de notre étude sont présentés ci-après :

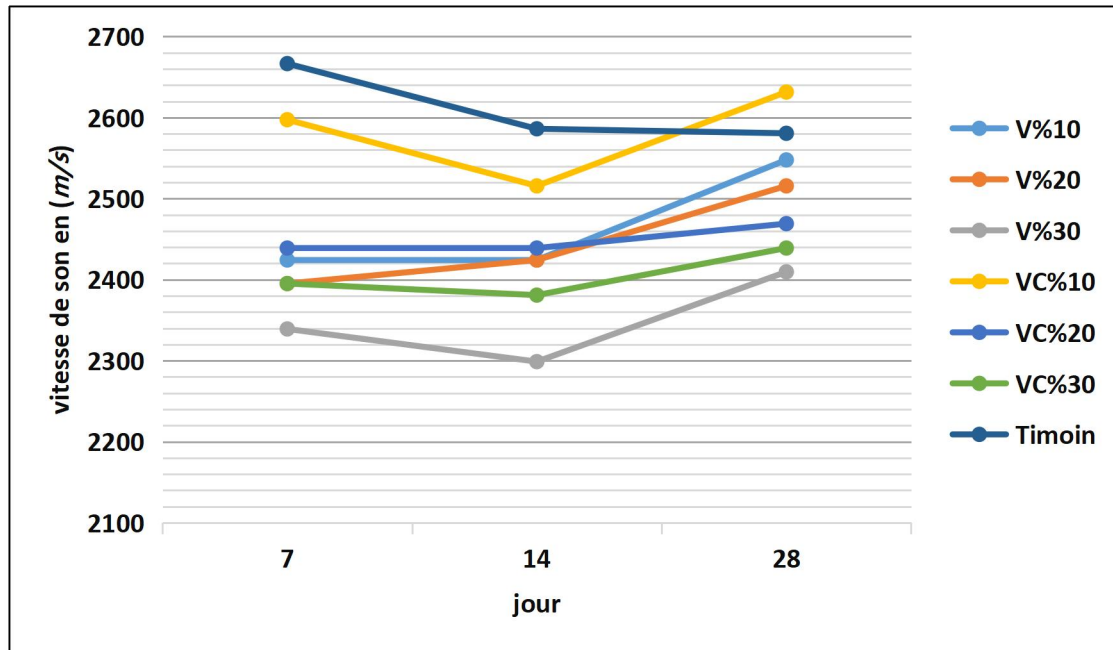


Figure IV-7 Évolution de la vitesse de propagation des ultrasons des mortiers contenant de la poudre de verre en fonction du temps.

IV.3.3.1. Analyse et discussion des résultats de la vitesse de propagation des ultrasons des mélanges contenant de la poudre de verre :

La figure illustre l'évolution de la vitesse de propagation du son des mélanges contenant de la poudre de verre traitée et non traitée avec différents taux de substitution (10%, 20% et 30%) par rapport au mélange de référence, durant les âges de cure de 7, 14 et 28 jours.

Les résultats montrent que la vitesse de propagation du son pour la plupart des mélanges s'améliore progressivement avec l'âge de cure, reflétant l'amélioration de la structure interne du mortier grâce à la continuité des réactions d'hydratation et à la réduction des vides internes.

- À l'âge de 7 jours, le mélange de référence a enregistré la valeur la plus élevée, estimée à environ **2665 m/s**, suivi du mélange VC 10% avec environ **2595 m/s**, tandis que le mélange V 30% a affiché la valeur la plus basse avec environ 2340 m/s. Les autres mélanges ont oscillé entre **2395 m/s** et **2440 m/s**.

- À 14 jours, une légère baisse a été observée pour certains mélanges, particulièrement VC 10% et V 30%, alors que le mélange de référence a maintenu la valeur la plus élevée à environ **2585 m/s**. Le mélange V 30% a enregistré la valeur la plus faible, estimée à environ **2300 m/s**, tandis que les autres valeurs ont varié entre **2380 m/s** et **2515 m/s**.
- À l'âge de 28 jours, la vitesse de propagation du son a augmenté pour la majorité des mélanges. Le mélange VC 10% a enregistré la valeur la plus élevée avec environ **2630 m/s**, dépassant ainsi le mélange de référence estimé à environ 2580 m/s, suivi du mélange V 10% avec environ **2550 m/s**. En revanche, le mélange V 30% a enregistré la valeur la plus basse avec environ **2410 m/s**, malgré son amélioration par rapport aux âges précédents.
- ✓ Nous concluons que l'utilisation de la poudre de verre, particulièrement après traitement thermique et à de faibles taux de substitution, contribue à l'amélioration de la vitesse de propagation du son, tandis que les taux de substitution élevés (30%) entraînent une baisse relative de la performance par rapport au mélange de référence.

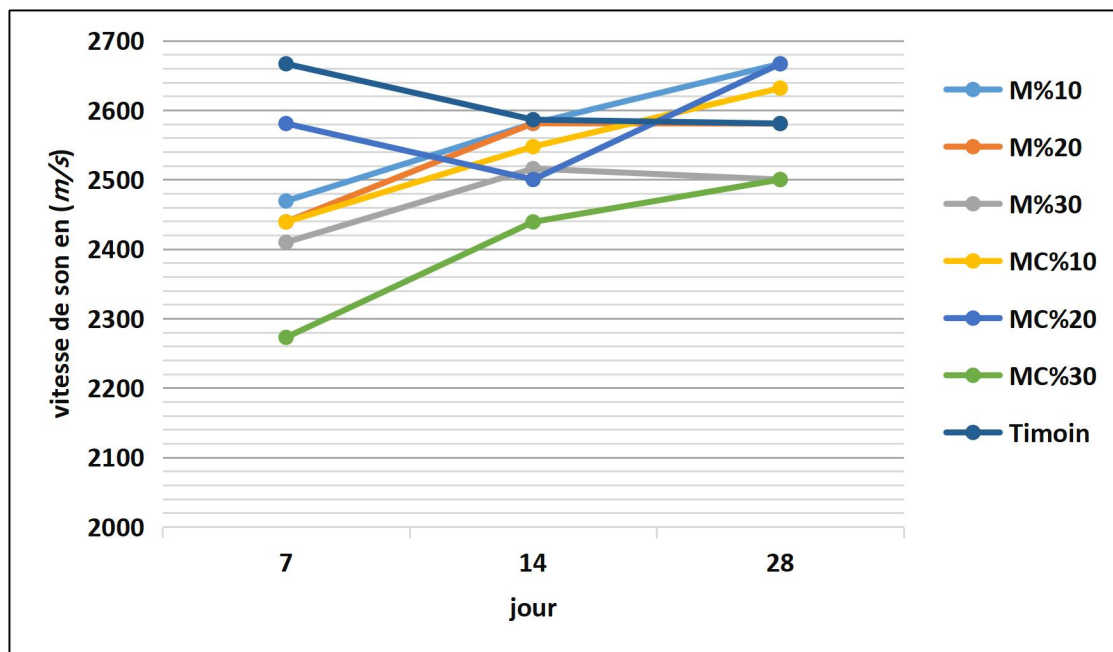


Figure IV-8 Évolution de la vitesse de propagation des ultrasons des mortiers contenant de la poudre de marbre en fonction du temps

IV.3.3.2. Analyse et discussion des résultats de la vitesse de propagation des ultrasons des mélanges contenant de la poudre de marbre :

La figure illustre l'évolution de la vitesse de propagation du son des mélanges contenant de la poudre de marbre traitée et non traitée avec différents taux de substitution (10%, 20% et 30%) par rapport au mélange de référence, durant les âges de cure de 7, 14 et 28 jours.

Les résultats montrent que la vitesse de propagation du son pour la plupart des mélanges augmente progressivement avec l'âge de cure, ce qui indique une amélioration de la densité interne du mortier et une diminution du taux de vides grâce à la continuité des réactions d'hydratation.

- À l'âge de 7 jours, le mélange de référence a enregistré la valeur la plus élevée, estimée à environ **2665 m/s**, suivi du mélange MC 20% avec environ **2580 m/s**, tandis que le mélange MC 30% a affiché la valeur la plus basse avec environ **2275 m/s**. Les autres mélanges ont oscillé entre **2410 m/s** et **2470 m/s**.
 - À 14 jours, la vitesse de propagation du son a augmenté pour la majorité des mélanges pour se situer entre **2440 m/s** et **2590 m/s** ; le mélange M 20% et le mélange de référence ont enregistré les valeurs les plus élevées, tandis que le mélange MC 30% est resté le plus faible par rapport aux autres compositions.
 - À l'âge de 28 jours, les mélanges M 10% et MC 20% ont enregistré la valeur la plus élevée avec environ **2665 m/s**, dépassant ainsi le mélange de référence estimé à environ **2580 m/s**, alors que le mélange MC 30% a enregistré la valeur la plus basse avec environ **2500 m/s**, malgré une amélioration notable par rapport aux âges précédents.
- ✓ Nous concluons que l'utilisation de la poudre de marbre, particulièrement à des taux de substitution faibles et modérés, contribue à l'amélioration de la vitesse de propagation du son avec l'âge de cure. De plus, le traitement thermique a donné des résultats positifs pour certains mélanges, notamment au taux de 20%.

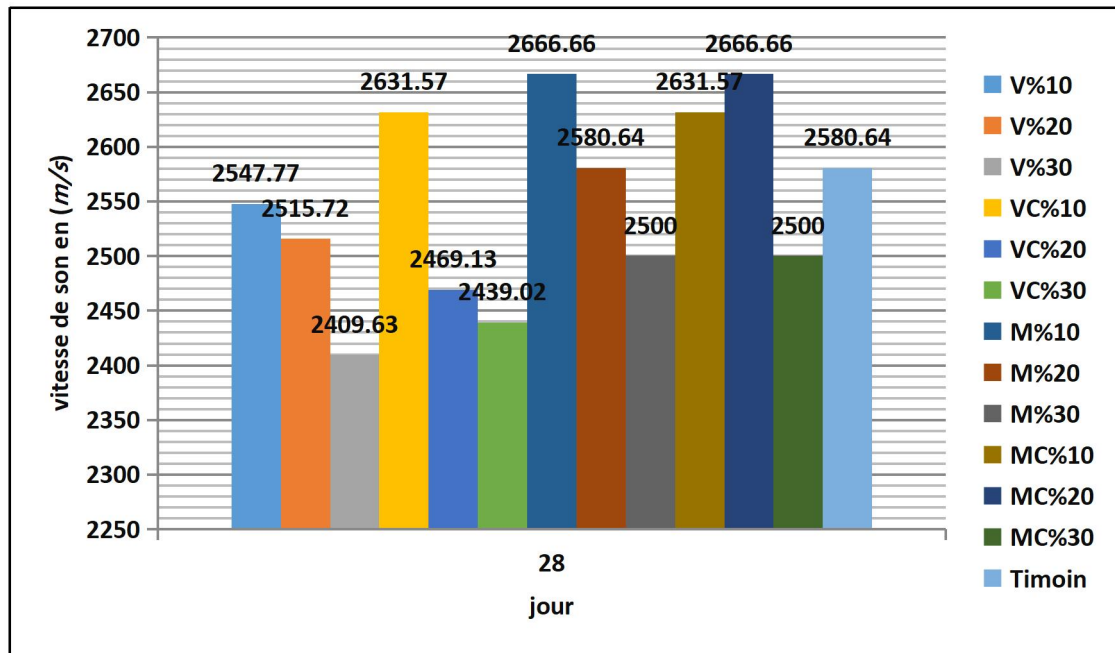


Figure IV-9 Comparaison de la vitesse de propagation des ultrasons des différents mélanges à 28 jours.

IV.3.3.3. Analyse comparative des résultats de la vitesse de propagation des ultrasons des différents mélanges :

Le graphique comparatif illustre les valeurs de la vitesse de propagation du son des différents mélanges étudiés à l'âge de 28 jours. Cet âge représente un stade avancé du développement de la structure interne du mortier, où les réactions d'hydratation ont considérablement évolué, permettant ainsi d'évaluer la qualité de la compacité, la densité interne des mélanges et l'influence des ajouts sur les propriétés physiques du mortier.

D'après les résultats enregistrés, nous constatons que certains mélanges traités thermiquement ont atteint des valeurs égales ou supérieures à celles du mélange de référence, ce qui indique une amélioration de la structure interne et une réduction du taux de vides. Les mélanges M 10% et MC 20% ont enregistré la vitesse de propagation la plus élevée avec environ 2666,66 m/s, dépassant le mélange de référence estimé à **2580,64 m/s**. De même, le mélange VC 10% a atteint une valeur élevée d'environ **2631,57 m/s**.

❖ Interprétation des résultats:

- La bonne performance des mélanges contenant de la poudre de verre traitée, en particulier le mélange VC 10%, s'explique par l'effet physique et chimique de la poudre de verre. D'une part, la finesse des particules a contribué à améliorer la compacité des composants et à combler les micro-vides au sein de la matrice cimentaire. D'autre part, l'activité pouzzolanique de la silice amorphe a favorisé la

formation de produits supplémentaires de gel C-S-H, ce qui a conduit à une augmentation de la densité interne et à une meilleure transmission des ondes sonores à travers le mortier.

- Concernant les mélanges à base de poudre de marbre, notamment M 10% et MC 20%, l'amélioration enregistrée est principalement due à l'effet de remplissage (Effet filler). Les fines particules améliorent la distribution granulaire et réduisent la porosité, ce qui influence positivement la vitesse de propagation du son.
- En revanche, les mélanges ayant un taux de substitution de 30% ont enregistré les valeurs les plus basses, soit environ **2409,63 m/s** pour le mélange V 30% et **2439,02 m/s** pour le mélange VC 30%. Cela indique qu'une augmentation excessive du taux de substitution entraîne une hausse de la porosité relative et une diminution de la densité de la structure interne, en raison de la réduction de la quantité de ciment effectif dans le mélange.
- En conclusion, l'utilisation de la poudre de verre ou de marbre, particulièrement après traitement thermique et à des taux de substitution faibles (10% et 20%), contribue à l'amélioration de la qualité de la structure interne du mortier, ce qui se traduit par une augmentation de la vitesse de propagation du son par rapport au mélange de référence.

IV.3.4. Essai de résistance à la flexion :

L'essai de résistance à la traction par flexion est l'un des essais mécaniques les plus importants réalisés sur le mortier, car il vise à déterminer la capacité du matériau à supporter les forces conduisant à la flexion avant d'atteindre la limite de rupture. Cet essai fournit un indicateur clair sur la flexibilité et la rigidité du mortier à la fois.

La résistance à la flexion est influencée par plusieurs facteurs, notamment le rapport eau/ciment E/C, la nature des matériaux constituant le mélange, ainsi que le taux de substitution des poudres ajoutées telles que la poudre de verre et la poudre de marbre, sans oublier le traitement thermique qui peut modifier les propriétés mécaniques du matériau.

Dans le cadre de cette étude, la résistance à la traction par flexion des éprouvettes de mortier préparées avec différents taux de substitution (0%, 10%, 20%, 30%) a été mesurée aux échéances de 7, 14, 28 et 60 jours, afin d'étudier l'évolution de la résistance dans le temps et l'influence des poudres ajoutées et du traitement thermique sur les performances mécaniques du mortier.

❖ Les résultats obtenus dans le cadre de notre étude sont présentés ci-après :

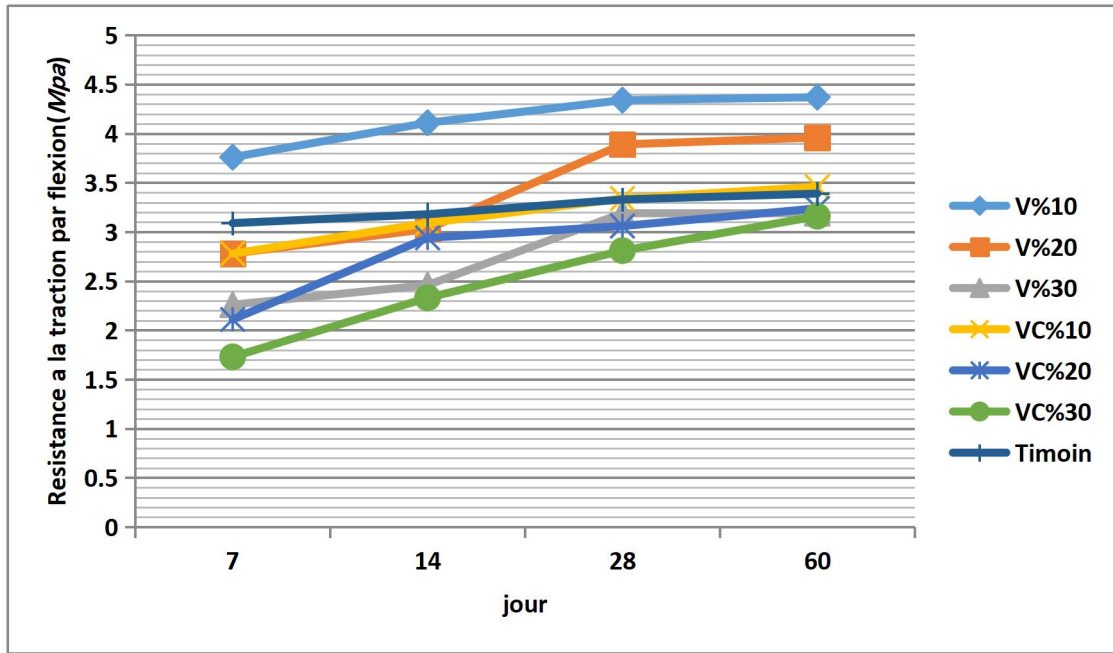


Figure IV-10 Évolution de la résistance à la flexion des mortiers contenant de la poudre de verre en fonction du temps.

IV.3.4.1 Analyse et discussion des résultats de la résistance à la flexion des mélanges contenant de la poudre de verre :

La figure illustre l'évolution de la résistance à la flexion des mélanges contenant de la poudre de verre traitée et non traitée avec différents taux de substitution (10%, 20% et 30%) par rapport au mélange de référence, durant les âges de cure de 7, 14, 28 et 60 jours.

Les résultats montrent que la résistance à la flexion de tous les mélanges augmente progressivement avec l'âge de cure, en raison de l'amélioration de la cohésion de la structure interne du mortier et de la continuité des réactions d'hydratation.

- À l'âge de 7 jours, les mélanges ont enregistré des valeurs divergentes oscillant entre **1,70 MPa** et **3,75 MPa** , le mélange V 10% a atteint la valeur la plus élevée, dépassant le mélange de référence estimé à **3,09 MPa**, tandis que le mélange VC 30% a enregistré la valeur la plus faible par rapport aux autres compositions.
- À 14 jours, la résistance à la flexion a continué de croître : le mélange V 10% a atteint environ **4,11MPa**, surpassant le mélange de référence, tandis que les valeurs de VC 10% et VC 20% ont convergé vers celles du témoin. Le mélange VC 30% est resté le moins performant.
- À l'âge de 28 jours, les mélanges V 10% et V 20% ont montré une amélioration nette, atteignant environ **4,37 MPa** et **3,96 MPa** respectivement, dépassant ainsi le mélange

de référence. En revanche, le mélange VC 30% est resté en dessous du niveau du témoin malgré son amélioration progressive.

- À l'âge de 60 jours, le mélange V 10% a réalisé la résistance à la flexion la plus élevée avec environ **4,37 MPa**, suivi du mélange V 20% avec environ **3,96 MPa**, surpassant ainsi le mélange de référence, alors que le mélange VC 30% a enregistré la valeur la plus basse malgré sa progression avec l'âge.

Nous concluons que l'utilisation de la poudre de verre non traitée à un faible taux de substitution (10%) a permis d'obtenir la meilleure performance en termes de résistance à la flexion par rapport aux autres mélanges étudiés.

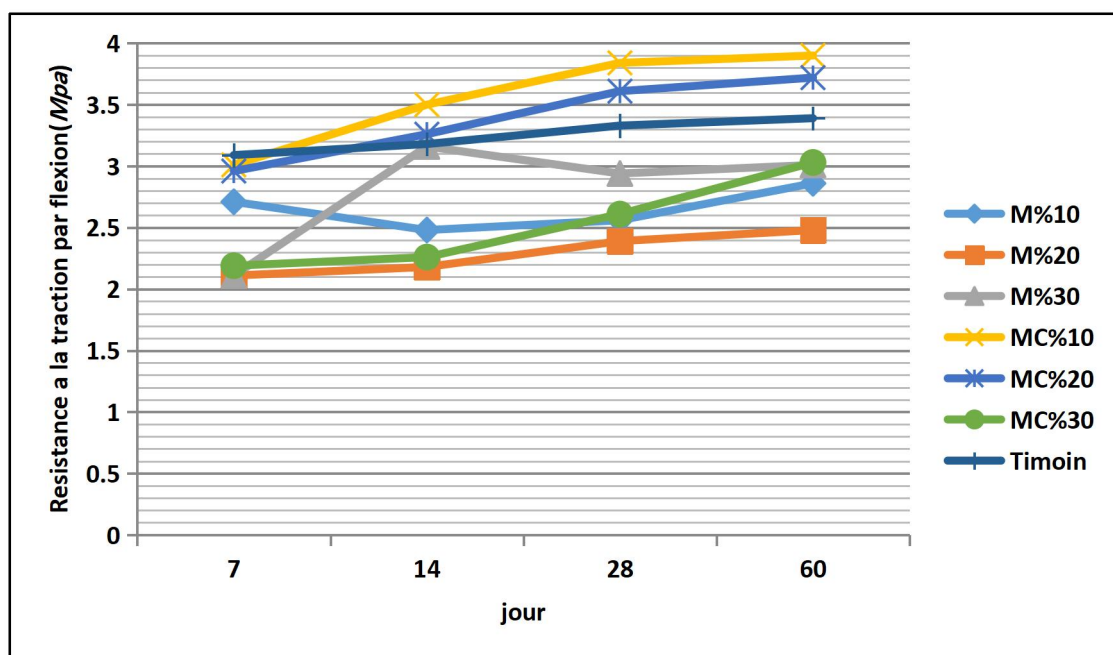


Figure IV-11 Évolution de la résistance à la flexion des mortiers contenant de la poudre de marbre en fonction du temps.

IV.3.4.2. Analyse et discussion des résultats de la résistance à la flexion des mélanges contenant de la poudre de marbre :

La figure illustre l'évolution de la résistance à la flexion des mélanges contenant de la poudre de marbre traitée et non traitée avec différents taux de substitution (10%, 20% et 30%) par rapport au mélange de référence, durant les âges de cure de 7, 14, 28 et 60 jours.

Les résultats montrent que la résistance à la flexion de tous les mélanges augmente progressivement avec l'âge de cure, en raison de l'amélioration de la cohésion de la structure interne du mortier et de la continuité des réactions d'hydratation.

- À l'âge de 7 jours, les mélanges ont enregistré des valeurs convergentes oscillant entre **2,1 MPa** et **3,0 MPa** ; les mélanges traités MC 10% et MC 20% ont atteint les valeurs les plus élevées par rapport aux autres compositions, tandis que les mélanges M 10% et M 20% ont enregistré les résultats les plus bas.
- À 14 jours, la résistance à la flexion a continué de croître : le mélange MC 10% a atteint environ **3,5 MPa**, dépassant ainsi le mélange de référence estimé à environ **3,2 MPa**, alors que les autres mélanges non traités sont restés à des valeurs relativement inférieures.
- À l'âge de 28 jours, les mélanges traités ont enregistré une amélioration nette, particulièrement les mélanges MC 10% et MC 20% qui ont atteint environ **3,84 MPa** et **3,61 MPa** respectivement, tandis que le mélange M 30% a enregistré une baisse relative par rapport à l'âge de 14 jours.

À l'âge de 60 jours, le mélange MC 10% a réalisé la résistance à la flexion la plus élevée avec environ **3,9 MPa**, suivi du mélange MC 20% avec environ **3,72 MPa**, surpassant ainsi le mélange de référence (**3,39 MPa**), alors que le mélange M 20% a enregistré la valeur la plus faible avec environ **2,48 MPa**.

Nous concluons que le traitement thermique de la poudre de marbre, particulièrement à de faibles taux de substitution, a contribué à l'amélioration de la résistance à la flexion et à l'obtention d'une performance mécanique supérieure par rapport aux mélanges non traités.

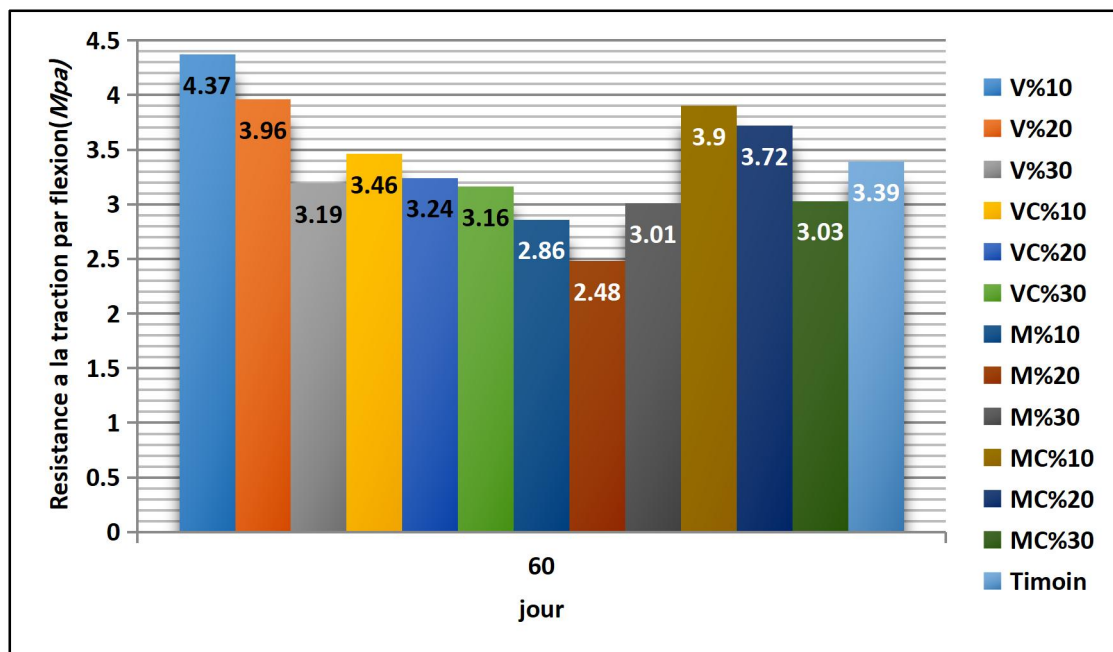


Figure IV-12 Comparaison de la résistance à la flexion des différents mélanges à 60 jours.

IV.3.4.3. Analyse comparative des résultats de la résistance à la flexion des différents mélanges :

Le graphique de comparaison illustre les valeurs de la résistance à la flexion des différents mélanges étudiés à l'âge de 60 jours. Cet âge a été choisi car il représente le stade où la majorité des réactions d'hydratation et des réactions pouzzolaniques sont achevées, permettant ainsi de mettre en évidence la performance réelle des mélanges et l'influence des ajouts sur les propriétés mécaniques du mortier.

D'après les résultats enregistrés, nous observons une variation nette entre les mélanges étudiés : le mélange V 10% a enregistré la résistance à la flexion la plus élevée avec **4,37 MPa**, dépassant le mélange de référence estimé à **3,39 MPa**, suivi du mélange V 20% avec **3,96 MPa**. De même, les mélanges MC 10% et MC 20% ont montré de bons résultats avec des valeurs respectives de **3,90 MPa** et **3,72 MPa**, tandis que le mélange M 20% a enregistré la valeur la plus faible avec **2,48 MPa**.

❖ Interprétation des résultats:

- La performance remarquable des mélanges de verre à faible taux de substitution s'explique par l'amélioration de la compacité de la matrice cimentaire et la réduction de la porosité grâce à la finesse des particules, en plus de l'activité pouzzolanique de la silice amorphe qui contribue à la formation du gel C-S-H, responsable de l'amélioration de la résistance à la flexion. La supériorité du verre non traité par rapport au verre traité peut être expliquée par une meilleure adhérence mécanique entre les particules de verre et la pâte cimentaire, ainsi que par la contribution de la texture superficielle des grains à la limitation de la propagation des microfissures au sein du mortier. En revanche, le traitement thermique pourrait modifier les caractéristiques de surface des fines particules, ce qui influencerait négativement la résistance à la flexion.
- Concernant les mélanges à base de marbre traité, les bons résultats enregistrés sont principalement dus à l'effet du traitement thermique dans l'amélioration de la cohésion de la structure interne du mortier.
- À l'inverse, l'augmentation du taux de substitution à 30% a entraîné une baisse relative de la résistance à la flexion, résultant de la diminution de la quantité de ciment effectif dans le mélange, ce qui affecte le développement des produits d'hydratation et les propriétés mécaniques du mortier.

IV.3.5. Essai de résistance à la compression :

L'essai de résistance à la compression est l'un des essais mécaniques les plus importants et les plus utilisés dans l'évaluation de la qualité des matériaux cimentaires, car il détermine la capacité du mortier à supporter les charges de compression avant d'atteindre la limite de rupture. Cette résistance constitue l'indicateur principal sur lequel on s'appuie pour classer le mortier et définir son domaine d'utilisation dans les travaux de construction et de génie civil.

La résistance à la compression est influencée par plusieurs facteurs essentiels, notamment le rapport eau/ciment E/C, la nature et la quantité des matériaux constituant le mélange, ainsi que le taux de substitution des poudres ajoutées telles que la poudre de verre et la poudre de marbre, sans oublier le traitement thermique qui influe directement sur le développement des réactions chimiques au sein du mortier.

Dans le cadre de cette étude, la résistance à la compression des éprouvettes de mortier préparées avec différents taux de substitution (0%, 10%, 20%, 30%) a été mesurée aux échéances de 7, 14, 28 et 60 jours, afin d'étudier l'évolution de la résistance dans le temps et de déterminer l'influence des poudres ajoutées et du traitement thermique sur les performances mécaniques du mortier.

Les résultats obtenus dans le cadre de notre étude sont présentés ci-après :

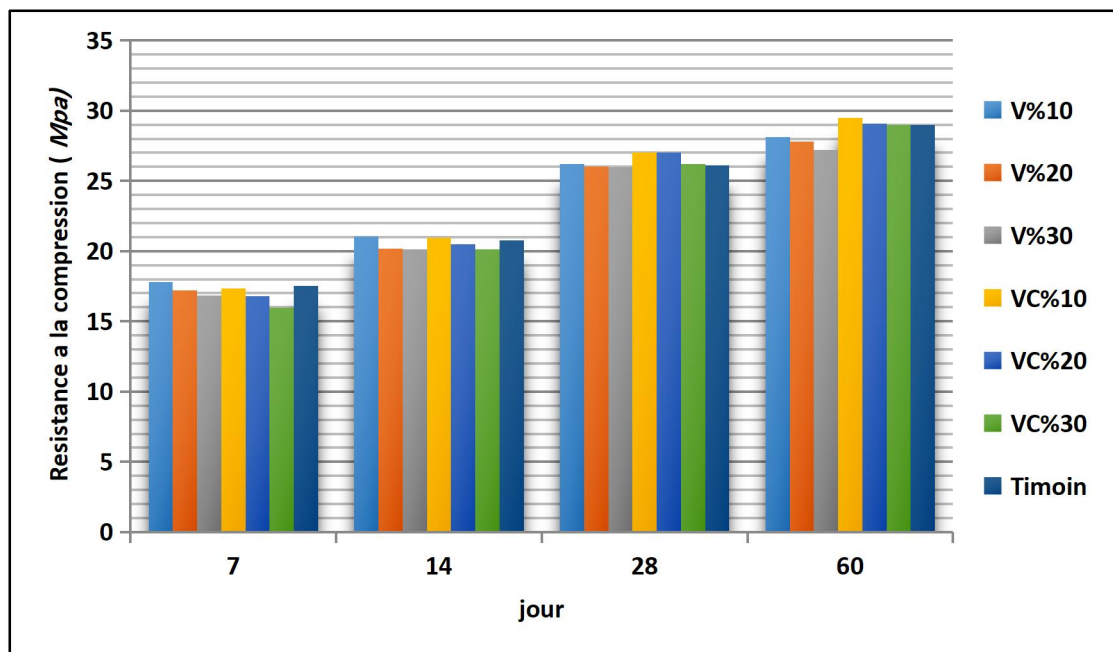


Figure IV-13 Évolution de la résistance à la compression des mortiers contenant de la poudre de verre en fonction du temps

IV.3.5.1. Analyse et discussion des résultats de la résistance à la compression des mélanges contenant de la poudre de verre :

La figure illustre l'évolution de la résistance à la compression des mélanges contenant de la poudre de verre traitée et non traitée avec différents taux de substitution (10%, 20% et 30%) par rapport au mélange de référence, durant les âges de cure de 7, 14, 28 et 60 jours.

Les résultats montrent que la résistance à la compression de tous les mélanges augmente progressivement avec l'âge de cure, en raison de la continuité des réactions d'hydratation et de l'amélioration de la cohésion de la structure interne du mortier.

- À l'âge de 7 jours, les mélanges ont enregistré des valeurs de résistance proches, variant entre **16 MPa** et **17,5 MPa** ; le mélange V 10% a atteint la valeur la plus élevée, tandis que le mélange VC 30% a affiché la résistance la plus faible par rapport aux autres compositions.
- À 14 jours, la résistance à la compression a continué de croître pour osciller entre environ **20 MPa** et **21 MPa**, avec une meilleure performance enregistrée pour les mélanges à faibles taux de substitution, particulièrement le mélange VC 10%.
- À l'âge de 28 jours, les mélanges contenant de la poudre de verre traitée ont montré une amélioration notable par rapport au verre non traité ; la résistance du mélange VC 10% a atteint environ **27.04 MPa**, dépassant ainsi le mélange de référence estimé à **26 MPa**.
- À 60 jours, le mélange VC 10% a réalisé la résistance à la compression la plus élevée avec environ **29,5 MPa**, surpassant tous les autres mélanges, y compris le témoin, tandis que le mélange V 30% a enregistré la valeur la plus basse.

Nous concluons que l'utilisation de la poudre de verre traitée, particulièrement au taux de substitution de 10%, permet d'améliorer la résistance à la compression et d'obtenir une performance mécanique supérieure par rapport aux autres mélanges étudiés.

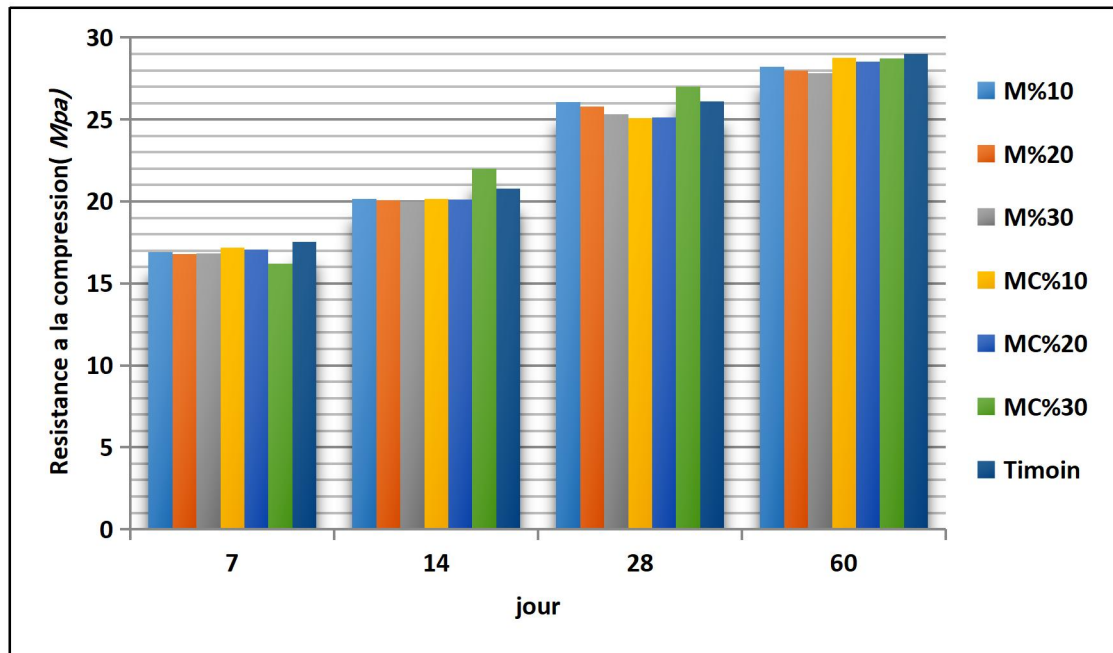


Figure IV-14 Évolution de la résistance à la compression des mortiers contenant de la poudre de marbre en fonction du temps.

IV.3.5.2. Analyse et discussion des résultats de la résistance à la compression des mélanges contenant de la poudre de marbre :

La figure illustre l'évolution de la résistance à la compression des mélanges contenant de la poudre de marbre traitée et non traitée avec différents taux de substitution (10%, 20% et 30%) par rapport au mélange de référence, durant les âges de cure de 7, 14, 28 et 60 jours.

Les résultats montrent que la résistance à la compression de tous les mélanges augmente progressivement avec l'âge de cure, en raison de la continuité des réactions d'hydratation et de l'amélioration de la structure interne du mortier.

- À l'âge de 7 jours, tous les mélanges ont enregistré des valeurs convergentes oscillant entre **16,5 MPa** et **17,0 MPa**, ce qui reste inférieur à la valeur du mélange de référence estimée à **17,3 MPa**.
- À 14 jours, la résistance à la compression s'est élevée pour se situer entre **20 MPa** et **22 MPa** ; le mélange MC 30% a enregistré la valeur la plus élevée, dépassant ainsi le mélange de référence.
- À l'âge de 28 jours, les mélanges M 10% et M 20% ont affiché les meilleurs résultats avec environ **26,2 MPa**, tandis que les mélanges MC 10% et MC 20% ont enregistré les valeurs les plus basses par rapport aux autres compositions.
- À l'âge de 60 jours, les valeurs de résistance de tous les mélanges sont devenues très proches, variant entre **27,8 MPa** et **29,0 MPa**. Les mélanges MC 10% et MC 20% ont

atteint les valeurs les plus élevées après le mélange de référence, tandis que le mélange M 30% a enregistré la résistance la plus faible.

Nous concluons que l'utilisation de la poudre de marbre, particulièrement après traitement thermique et à de faibles taux de substitution, permet d'obtenir des résultats proches du mélange de référence en termes de résistance à la compression.

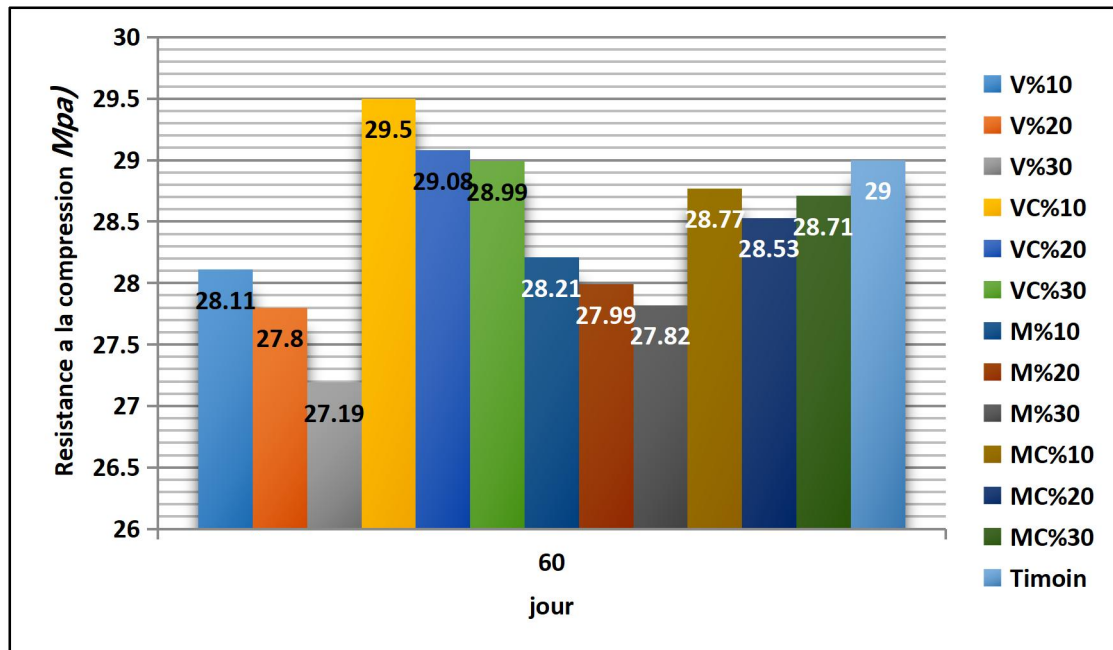


Figure IV-15 Comparaison de la résistance à la compression des différents mélanges à 60 jours.

IV.3.5.3. Analyse comparative des résultats de la résistance à la compression des différents mélanges :

Le graphique comparatif illustre les valeurs de la résistance à la compression des différents mélanges étudiés à l'âge de 60 jours. Cet âge a été choisi car il correspond à l'achèvement de la majeure partie des réactions d'hydratation et des réactions pouzzolaniques, permettant ainsi de mettre en évidence la performance réelle des mélanges et l'influence des ajouts sur les propriétés mécaniques du mortier.

D'après les résultats enregistrés, nous constatons que la plupart des mélanges ont atteint des valeurs proches de celles du mélange de référence, particulièrement les mélanges traités thermiquement. Le mélange VC 10% a enregistré la résistance à la compression la plus élevée, soit environ **29,5 MPa**, dépassant le mélange de référence estimé à **29 MPa**. De même, les mélanges MC 10% et MC 20% ont montré des résultats très proches du témoin avec une valeur d'environ **28,8 MPa**.

❖ Interprétation des résultats:

- La performance remarquable du mélange VC 10% s'explique par le double effet, physique et chimique, de la poudre de verre traitée. Sur le plan physique, les fines particules ont contribué à l'amélioration de la compacité de la matrice cimentaire et au remplissage des micro-vides, entraînant une réduction de la porosité et une augmentation de la densité interne du mortier. Sur le plan chimique, l'activité pouzzolanique de la silice amorphe présente dans la poudre de verre a permis de réagir avec l'hydroxyde de calcium issu de l'hydratation du ciment, favorisant la formation d'une quantité supplémentaire de gel C-S-H, responsable de l'amélioration de la résistance à la compression.
- Concernant les mélanges à base de poudre de marbre, les résultats proches du mélange de référence sont principalement dus à l'effet de remplissage (Effet filler). La poudre de marbre contribue à l'amélioration de la structure granulaire et à la réduction des vides au sein de la matrice cimentaire, avec un effet chimique limité par rapport à la poudre de verre.
- En revanche, l'augmentation du taux de substitution à 30 % a entraîné une baisse relative de la résistance à la compression, résultant de la diminution de la quantité de ciment effectif dans le mélange, ce qui affecte le développement des produits d'hydratation et la structure mécanique du mortier.

Conclusion générale

La présente étude avait pour objectif d'évaluer l'effet de la substitution partielle du ciment par la poudre de verre et la poudre de marbre, traitées et non traitées thermiquement, sur les propriétés physiques et mécaniques du mortier à l'état durci.

Les résultats obtenus au terme de cette étude expérimentale confirment que l'incorporation de ces deux matériaux dans la matrice cimentaire est tout à fait réalisable et présente des avantages concrets, sous réserve d'un dosage approprié. Sur le plan mécanique, le mélange à base de poudre de verre traitée à 10% a enregistré la résistance à la compression la plus élevée, dépassant même le mélange de référence à l'âge de 60 jours, ce qui confirme l'efficacité du traitement thermique dans l'amélioration de la structure interne du mortier. Quant à la résistance à la flexion, c'est le mélange à base de poudre de verre non traitée à 10% qui s'est distingué, en raison d'une meilleure adhérence mécanique entre les particules et la pâte cimentaire.

Sur le plan de la durabilité, les mélanges à base de poudre de marbre traitée à 20% et 30% ont enregistré les plus faibles valeurs de retrait, traduisant une meilleure stabilité volumique. Les essais ultrasoniques ont également confirmé l'amélioration de la densité interne pour les mélanges traités thermiquement, notamment la poudre de verre traitée à 10% et la poudre de marbre traitée à 20%, qui ont présenté les vitesses de propagation les plus élevées. Concernant l'absorption capillaire, les mélanges à faibles taux de substitution, particulièrement à 10%, ont montré des performances proches du mélange de référence, alors qu'un taux de 30% a entraîné une augmentation notable de la porosité et une dégradation des performances.

Ces résultats montrent que la combinaison optimale repose sur des taux de substitution modérés de 10% et 20%, associés au traitement thermique, permettant d'élaborer des mortiers conjuguant performance mécanique et durabilité, tout en valorisant des déchets industriels nuisibles à l'environnement et en contribuant à la réduction de l'empreinte carbone du secteur de la construction.

Cette étude ouvre ainsi des perspectives prometteuses pour le développement de matériaux de construction durables et respectueux de l'environnement, fondés sur la valorisation des déchets industriels locaux.

Recommandations

- Étudier l'effet de taux de substitution supplémentaires de la poudre de verre et de la poudre de marbre afin de déterminer avec plus de précision le pourcentage optimal pour améliorer les propriétés du mortier.
- Réaliser des essais à des âges de cure plus avancés, tels que 90 et 180 jours, afin d'évaluer l'évolution des réactions pouzzolaniques et leurs effets à long terme.

Références bibliographiques

1. Cowper, A. D. (2015). Limes and Mixes: Their Property and Use in Construction. Routledge Revivals(Originally published in 1927).
2. بشنب زكرياء و صخر محمد بهاء الدين دراسة مثانة المالط المحتوي على الكثبان الرملية كبديل جزئي لرمال المحاجر(مذكرة تخرج ماستر) جامعة قاصدي مرباح ورقلة دفعة2022-2023
3. رزيق عبد الرحمان و حمزة محمد الشريف :الملاط في صيانة و ترميم الفسيفساء.مجلة الدراسات الثرية2021-12-19.
4. مريقة ابراهيم و رحمانى كمال :المساهمة في تحسين خصائص خرسانة رمل المحاجر بواسطة التصحيح الحبيبي(مذكرة ماستر) الوادي جامعة الشهيد حمه لخضر كلية العلوم و التكنولوجيا2019.
5. -أحمد طرطارو براجي صباح :المياه وإشكالية الاستدامة.(مداخلة مقدمة إلى الملتقى الوطني حول إقتصاديات المياه.)بسكرة:جامعة محمد خيضر كلية العلوم الاقتصادية و التجارية و التسيير
6. -حمدي شهاب الدين .تكنولوجيا الخرسانة جامعة الزقزقي.كلية الهندسة قسم الهندسة النشائية صفحة 50
7. محمد محمود مهنا تكنولوجيا الخرسانة جامعة النبار قسم هندسة مدنية2020-2019. صفحة29
8. BOUBEKEUR ,Cours de Matériaux de Construction 01 licence Génie CIVIL ,Centre universitaire de Tissemsilt.2017.
9. CIM BETON ,<Collection technique Ciment et betons> Conception et realisation: Am principe paris .Edition 2005.
10. Jackson, N., & Dhir, R. K. (1996). "Civil Engineering Materials". Macmillan International Higher Education.
11. ATHAMNIA, Hicham ; BENHAMIDA, Bilal. Caractérisation de l'ouvrabilité des mortiers et des bétons. Mémoire de Master, sous la direction de Pr. BENOUIS Abdelhalim, Juin 2013.
12. NF P 15 - 361 29 oct. 2011 – Le retrait (Norme NF P 15- 361): Il est mesuré sur prismes de 4 x 4 x 16 cm, conservés à 20 °C et à 50,5 % d'humidité relative
13. Brahma A. ; « Le béton » ; édition OPU ; 1996
14. ن شنه سعاد، شطي أماني، كباس عاطف. دراسة تأثير مساحيق بقايا مواد البناء ورمال الكثبان على الخرسانة ذاتية التوضع كإضافات إسمنتية، جامعة الوادي، 2025
15. Mechri. H, Messalta. S; (2021). The Valuation of recycling household solid waste in light of sustainable development requirements – Setif's Ecoset case study
16. د. هدى مسعود (9 فبراير "2001 إسلام أون لاين- " إعادة التدوير. حيث تلقي البيئة مع الاقتصاد.
17. عبدالسلام علي زين العابدين، و محمد بن عبد المرضي عرفات، (2007)، صفحة (45)، تلوث البيئة عمن المدينة، القاهرة، الهيئة المصرية العامة للكتاب.
18. Belferrag. A, kriker. A, et khenfer. E ; (2007). Valorisation des fibres métalliques issues des déchets pneumatiques dans les matériaux de constructions en zones sahariennes. Annales de la Faculté des Sciences et des Sciences de l'Ingénieur, vol. 1, no 2, p. 6-12.

Références bibliographiques

19. Shekhawat. B, et Aggarwal. D; (2014). Utilisation of Waste Glass Powder in Concrete—A Literature Review. International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology, vol. 8753.
20. Benhelal, E., et al. (2013). "Global strategies and potentials to curb CO2 emissions in cement industry". Journal of Cleaner Production
21. - Kassem.I.A, H.I.Al-khatib, I.S.Fathi; (2011). "SOME PROPERTIES OF MORTAR WITH CRUSHED GLASS AS FINE AGGREGATE", Journal for Engineering Sciences
22. Jani Y., Hogland W., Waste glass in the production of cement and concrete: a review, Journal of Environmental Chemical Engineering, Vol. 2, N° 3, 2014, pp. 1767-1775.
23. Alemu M.Y., Yehualaw M.D., Nebiyu W.M., Nebebe M.D., Taffese W.Z., Marble and Glass Waste Powder in Cement Mortar, Applied Sciences, Vol. 15, N° 7, 2025, Article 3930, Published on 03 April 2025.
24. Evaluating the utilization of".Aliabdo, A. A., Abd Elmoaty, M., & Awaad, E. M. (2014). marble dust in concrete and mortar". Journal of Building Engineering
25. Kurdi A. et al., Marble Powder as a Sustainable Cement Replacement: A Review of .2025, p. 736 ,Mechanical Properties, Sustainability, Vol. 17, N° 2
26. Use of waste".Hebhoub, H., Aoun, H., Belachia, M., Houari, H., & Ghorbel, E. (2011). marble aggregates in concrete". Construction and Building Materials
27. Labidi, A., Soualah, B. Y., Guediri, A., & Mamanou, A.Étude du mortier (Mémoire de fin d'études)Université d'El Oued, Promotion Juin 2024.
28. نصري أبوب و بورقة طارق و عطا هلال السعيد : تأثير دمج رمل الكتبان المسحوقة على خصائص المالمط - مذكرة ماستر جامعة الشهيد حمه لخضر الوادي كلية العلوم و التكنولوجيا دفعة 2020-2021
29. [NF P 18-598, octobre 1991]. Norme française : Équivalent de sable.
30. [NF P 18-560]. Norme française : Analyse granulométrique.
31. [NF P 94-064, novembre 1993]. Norme française : Détermination de la masse volumique absolue et apparente.
32. [NF EN 196-1, 1995]. Norme française : Détermination des résistances mécaniques (indice de classement P 15-471).
33. [NBN EN 1015-3, 2007]. Norme belge : Consistance du mortier frais à la table à secousses.
34. [NF P 18-452]. Norme française : Essais de performance.
35. [NF P 18-433, octobre 2001]. Norme française : Résistance à la flexion sur éprouvettes.
36. [NF P 18-560, septembre 1990]. Norme française : Analyse granulométrique par tamisage.

Annexes



50kg

ماتين
MATINE

ALGÉRIE



Ciment portland au Calcaire

NA442 CEM II/B-L 42,5 N

Matine Ciment gris pour bétons de haute-performance destiné à la construction des Ouvrages d'Art, infrastructure et superstructure pour bâtiments

Matine
NA442 CEM II/B-L 42,5 N

Matine est certifié, conforme à la norme Algérienne (NA442 – 2013) et Européenne (EN 197-1)

AVANTAGES PRODUIT



- Une résistance initiale élevée pour vos ouvrages nécessitant un décoffrage rapide
- Favorise la maniabilité du béton et le maintien de sa rhéologie
- Une Classe Vraie qui offre une haute performance au béton.
- Meilleure durabilité du béton.



Figure : Éprouvettes dans le moule



Figure : Éprouvettes conservées à l'air libre



Figure : Dispositif de l'essai de compression



Figure : Représentation schématique de l'essai de flexion



Figure X : Illustration de l'essai d'auscultation sonore (ultrasons)



République démocratique populaire algérienne
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique.
Université Chahid Hamma Lakhdar d'El Oued
Centre de développement de l'entrepreneuriat de l'Université d'El Oued



Faculté / Institut :Technologie

Département : Génie Civil et Hydraulique

Niveau et spécialité :Master – Matériaux en Génie Civil

Mémoire de fin d'études pour l'obtention d'un diplôme universitaire – Projet d'une entreprise économique

Production d'un ciment écologique à base de matériaux recyclés (poudre de verre et de
(marbre

Introduction dans le cadre de l'obtention du certificat d'entreprise économique
(mini-entreprise), conformément à la décision ministérielle 1275

RecyCem



Année Universitaire : 2026 / 2025

Table des matières

Premièrement : Équipe de travail et encadrement

- 1- Équipe de travail
- 2- Équipe d'encadrement

Deuxièmement : Présentation du projet

1. Détermination de l'activité
2. Secteur d'activité
3. Code d'activité

Troisièmement : Description de l'idée du projet

1. Quels sont mes produits / services
2. Qui achètera mes produits / services
3. Où mon projet sera-t-il réalisé et comment mes produits / services atteindront les clients
4. Comment mon projet fonctionnera
5. Justifications du choix de l'idée de mon projet

Quatrièmement : Étude de marché

1. Nature et taille de la concurrence : qui sont les concurrents directs et indirects ?
2. Taille du marché cible et potentiel
3. Analyse SWOT : forces, faiblesses, opportunités et menaces de mon projet
4. Modèle économique BMC de mon projet

Cinquièmement : Étude technique

1. Besoins du projet en ressources humaines : (quels sont les besoins en employés ?)
2. Lieu d'implantation de mon projet et justifications de son choix : où sera situé mon projet ?

Sixièmement : Estimation des coûts et des revenus de mon projet

- 1 - Estimation des coûts de mon projet
 - 1.1 Estimation du montant total de l'investissement de mon projet
 - 2.1 Estimation des achats de matières premières de mon projet
 - 3.1 Estimation des coûts de la main-d'œuvre de mon projet
 - 4.1 Estimation des coûts communs de mon projet
 - 5.1 Estimation des coûts d'amortissement des investissements de mon projet
- 2 - Estimation des revenus de mon projet
 - 1.2 Estimation du volume des ventes annuelles de mon projet
 - 2.2 Calcul du résultat annuel de mon projet

Premièrement : Équipe de travail et encadrement

1- Équipe de travail

Équipe du projet	Spécialité	Faculté / Institut	Expérience / compétence dans le domaine du projet
REHOUMA Oujidane	Matériaux en Génie Civil	FACULTE DE TECHNOLOGIE	• Entrepreneur • Connaissances techniques et scientifiques dans le domaine des matériaux de construction
BEN AMMAR Jouhaina	Matériaux en Génie Civil	FACULTE DE TECHNOLOGIE	• Entrepreneur • Connaissances techniques et scientifiques dans le domaine des matériaux de construction

2- Équipe d'encadrement

Encadreur	Spécialité	Faculté / Institut
BEDADI Laid	Génie Civil	FACULTE DE TECHNOLOGIE

Deuxièmement : Présentation du projet :

Code d'activité (conformément à la nomenclature des activités du Centre National du Registre du Commerce – CNRC)	Secteur d'activité	Détermination de l'activité
702104	Industriel	Production de matériaux de construction

Troisièmement : Description de l'idée du projet :

Quels sont mes produits ou services :

Production de matériaux de construction écologiques à partir du recyclage de poudre de verre et de déchets de marbre, utilisés comme substitut partiel au ciment traditionnel dans la fabrication de ciment écologique et d'autres matériaux de construction

L'objectif est de réduire les coûts et les impacts environnementaux tout en préservant les caractéristiques techniques requises

Qui achètera mes produits / services:

Les entreprises de construction et de travaux publics, les entrepreneurs, les fabricants de matériaux de construction, les magasins de vente de matériaux de construction, ainsi que les cimenteries intéressées par les solutions écologiques et les matériaux de construction durables

Où mon projet sera-t-il implanté et comment mes produits / services parviendront-ils aux clients :

Le projet sera implanté dans une zone industrielle au niveau de la wilaya, en raison de la disponibilité des infrastructures adaptées ainsi que de la facilité de transport et de distribution.

Les produits seront commercialisés à travers :

- la vente directe aux entrepreneurs et aux entreprises de construction ;
- la distribution via les magasins de matériaux de construction ;
- la communication par téléphone et via les réseaux sociaux ;
- ainsi que des services de livraison assurés par des moyens de transport appartenant à l'entreprise.

Comment mon projet fonctionnera-t-il :

Le projet sera géré par les porteurs du projet, avec l'appui d'ingénieurs et de techniciens spécialisés dans les matériaux de construction et le recyclage, ainsi que d'ouvriers qualifiés dans l'utilisation des équipements industriels, le tri, le broyage, l'emballage et le transport..

Justifications du choix de l'idée de mon projet :

- Contribuer à la réduction des déchets solides issus du verre et du marbre
- Réduire les émissions de dioxyde de carbone liées à l'industrie du ciment traditionnel
- Préserver les ressources naturelles et encourager le recyclage
- Répondre à la demande croissante en matériaux de construction écologiques
- Assurer une rentabilité économique et des perspectives d'avenir prometteuses pour le projet
- Soutenir l'orientation vers l'économie verte et le développement durable en Algérie

Quatrièmement : Étude de marché

1. Nature et intensité de la concurrence :

Concurrents	Nature de la concurrence		Force de la concurrence		
	Indirecte	Directe	Forte	Moyenne	Faible
• GICA (Groupe Industriel des Ciments d'Algérie)		✓	✓		
• Lafarge Algérie (Holcim Algérie).		✓	✓		
• CILAS (Cimenterie de Biskra)		✓	✓		
• SCIMAT (Société des Ciments de Mascara et de l'Ouest)		✓		✓	
• Entreprises de matériaux de construction traditionnels	✓			✓	

Mentionnez les stratégies de votre entreprise pour faire face à ses concurrents :

- Stratégie de développement et d'innovation.
- Stratégie de qualité.
- Stratégie de tarification.

1. Taille du marché cible et potentiel :

- Taille du marché cible :

Le marché cible représente l'ensemble des personnes et des institutions auxquelles les produits/services du projet seront proposés. Il est principalement composé de :

- Les entreprises de construction et de travaux publics ;
- Les promoteurs immobiliers ;
- Les usines et ateliers de matériaux de construction ;
- Les institutions intéressées par les matériaux de construction écologiques.

Parmi les clients potentiels figurent également :

- Les entreprises de bâtiment et de travaux publics ;
- Les bureaux d'études et d'ingénierie civile ;
- Les magasins de vente de matériaux de construction ;
- Les établissements publics locaux.

- Taille du marché potentiel

Le marché potentiel comprend l'ensemble des personnes et des institutions susceptibles d'avoir besoin, à l'avenir, de ciment écologique et de matériaux de construction durables, notamment avec l'intérêt croissant porté à l'économie verte et au recyclage.

Le projet vise principalement :

- Les entreprises de construction et de travaux publics ;
- Les promoteurs immobiliers ;
- Les entreprises industrielles ;
- Les collectivités et organismes locaux intéressés par les projets environnementaux.

L'intérêt des clients pour ce produit est motivé par :

- Son prix compétitif ;
- Sa disponibilité au niveau local ;
- Sa contribution à la protection de l'environnement ;
- La réduction du coût de certains matériaux de construction.

De plus, le marché local et régional connaît une croissance continue des projets de construction et d'urbanisme, ce qui contribue à l'augmentation de la demande en matériaux de construction alternatifs et écologiques.

Analyse SWOT :

forces, faiblesses, opportunités et menaces de mon projet :

Points forts :

- Utilisation de matériaux recyclés (poudre de verre et déchets de marbre) dans la production du ciment écologique.
- Contribution à la protection de l'environnement et à la réduction des déchets industriels.
- Réduction des coûts de production grâce à l'utilisation de matières premières recyclées.
- Disponibilité locale des matières premières nécessaires au projet.
- Présence d'une équipe composée d'ingénieurs et de techniciens spécialisés dans les matériaux de construction et le recyclage.
- Réponse à la demande croissante en matériaux de construction durables et écologiques.

Points faibles :

- Besoin d'un investissement initial important pour les équipements et les machines industrielles.
- Manque de notoriété du produit sur le marché au début du projet.
- Nécessité d'obtenir des certifications techniques et environnementales pour renforcer la confiance des clients.
- Concurrence avec les matériaux de construction traditionnels déjà bien implantés sur le marché.
- Coûts liés au transport, au tri et au traitement des déchets recyclés.

Opportunités :

- Croissance de l'intérêt pour l'économie verte et le développement durable en Algérie.
- Augmentation des projets de construction et d'urbanisme aux niveaux local et national.
- Possibilité de bénéficier des programmes et aides destinés aux projets écologiques et innovants.
- Développement futur de partenariats avec les cimenteries et les entreprises de matériaux de construction.
- Sensibilisation croissante à l'importance du recyclage et de la protection de l'environnement.

Menaces :

- Fluctuation des prix des matières premières et des coûts de transport.
- Forte concurrence des producteurs de ciment traditionnel.
- Éventuelles difficultés réglementaires ou administratives liées aux autorisations et certifications.
- Résistance de certains clients à l'utilisation de nouveaux matériaux écologiques.
- Instabilité économique pouvant influencer le secteur de la construction et les investissements.

Tableau d'analyse SWOT

SWOT	Facteurs contribuant à la réalisation des objectifs	Facteurs entravant la réalisation des objectifs
Facteurs Internes	Points de force Strengths - Le caractère innovant et écologique du projet. - Disponibilité locale des matières premières et facilité d'approvisionnement. - Réduction du coût de certaines matières premières par rapport au ciment traditionnel..	Points de faiblesse Weaknesses - Besoin d'équipements industriels et - de techniques de traitement .spécifiques - Nécessité d'un contrôle permanent - .de la qualité des matériaux recyclés - Coût élevé du démarrage et de - .l'investissement initial
Facteurs Externes	Opportunities Les opportunités - Intérêt croissant pour l'économie verte et les matériaux de construction durables. - Augmentation de la demande en matériaux de construction dans le secteur du bâtiment et des travaux publics. - Possibilité d'établir des partenariats avec des entreprises de recyclage et de construction.	Threats les Menaces - Concurrence avec les cimenteries - .traditionnelles - Fluctuation des prix de l'énergie, du - .transport et des matières premières - Difficulté à convaincre certains - clients d'adopter de nouveaux .produits écologiques

1. Modèle économique BMC de mon projet :

Partenaires clés	Activités principales	Proposition de valeur	Relation avec les clients	Clients
· Fournisseurs de verre et de marbre recyclés · Entreprises de transport et de distribution · Fournisseurs d'équipements industriels · Laboratoires et centres de contrôle de qualité · Entreprises de construction et de travaux publics	Collecte et traitement des matériaux recyclés Fabrication du ciment écologique Contrôle de la qualité du produit Commercialisation et distribution	Production d'un ciment écologique de haute qualité à partir de matériaux recyclés contribuant à la réduction des déchets et à la protection de l'environnement Offre d'un produit à un prix compétitif par rapport à certains types de ciment traditionnel	Fourniture d'un produit de haute qualité · Respect des délais de livraison · Suivi des commandes et service client · Accompagnement technique et conseils spécialisés	· Entreprises de construction et de travaux publics · Entrepreneurs · Magasins de vente de matériaux de construction en gros et au détail · Promoteurs et investisseurs immobiliers
	Ressources clés Matières premières · Équipements de production · Main-d'œuvre qualifiée · Usine et moyens de transport	Fourniture d'un ciment présentant une bonne résistance et des caractéristiques techniques adaptées à la construction Garantie de disponibilité d'un produit local et économique répondant aux besoins du marché Contribution au soutien de l'économie verte et du développement durable	Canaux de distribution · Vente directe · Magasins de matériaux de construction · Entreprises de construction · Marketing numérique et vente en ligne	
Coûts · Achat des matières premières · Électricité et énergie · Salaires des employés · Transport et maintenance · Marketing		Revenus · Revenus financiers issus des ventes · Acquisition d'une position concurrentielle sur le marché		

Cinquièmement : Étude technique

1. Besoins du projet en ressources humaines :

Nature des utilisateurs	Nombre	Compétences / qualifications
Gérant	2	Gestion de projet et administration
Cadres (ingénieurs, chefs de service, chargés de marketing, chefs d'ateliers, etc.)	2\3	Connaissances techniques en matériaux de construction et marketing
Agents de maîtrise (chargés du magasin, secrétariat, etc.)	3\5	Gestion des stocks et organisation administrative
Agents d'exécution (chauffeur, agent de sécurité, agent de nettoyage, etc.)	2/3	Production, manutention, sécurité et entretien

Choix du lieu d'implantation du projet : où sera situé le projet et quelles sont les justifications de ce choix ?

Le projet sera implanté dans la wilaya d'El Oued.

Justifications :

Disponibilité abondante des matières premières dans la région.

Position stratégique de la wilaya et proximité des wilayas voisines.

Contribution à la résolution des problèmes environnementaux et à la réduction des déchets.

Proposition d'une alternative technologique et économique dans le domaine des matériaux de construction.

Sixièmement : Estimation des coûts et des revenus du projet

1 - Estimation des coûts du projet

1.1 Estimation du montant total de l'investissement : (coût du projet)

Désignation	Montant (DA)
Machines et équipements de production	6.250.000
Aménagement du local	450.000
Actifs biologiques (animaux, arbres, etc.)	/
Matériel roulant	2.000.000
Matériel de bureau	120.000
Matériel informatique	180.000
Matériel audiovisuel	/
Matériel de télécommunication	50.000
Installation des équipements	250.000
Frais généraux liés à la création	130.000
Fonds de roulement (matières premières)	1.200.000
Montant total de l'investissement (coût du projet)	10.630.000

1.1 Estimation des achats de matières premières du projet

Liste des matières premières		Année 1	Année 2	Année 3
Matière première 1 Ciment	Quantité achetée	600tn	720tn	840tn
	Prix unité	14.000	14.500	15.000
	Coût d'achat de la matière première 1	8.400.000	10.440.000	12.600.000
Matière première 2 Poudre de verre	Quantité achetée	150tn	180tn	210tn
	Prix unité	4.000	4.500	5.000
	Coût d'achat de la matière première 2	600.000	810.000	1.050.000
Matière première 3 Poudre de marbre	Quantité achetée	120tn	144tn	168tn
	Prix unité	5.000	5.500	6.000
	Coût d'achat de la matière première 3	600.000	792.000	1.008.000
Montant total des achats de matières premières		9.600.000	12.042.000	14.658.000

3.1 – Estimation des coûts de la main-d'œuvre

Intitulé du poste	Nombre de travailleurs			Montant du salaire		
	Année 1	Année 2	Année 3	Année 1	Année 2	Année 3
Le gérant / ou les gérants	2	2	2	70.000	75.000	80.000
Cadres (ingénieurs, chefs de service, chargés de marketing, chefs d'ateliers, etc.)	2	3	3	60.000	65.000	70.000
Agents de maîtrise (chargés du magasin, secrétariat, etc.)	3	4	5	40.000	45.000	50.000
Agents d'exécution (chauffeur, agent de sécurité, agent de nettoyage, etc.)	2	2	3	35.000	40.000	45.000

4.1. Estimation des coûts externes du projet

Désignation	Année 1	Année 2	Année 3
Frais d'électricité / de gaz / d'eau	480.000	560.000	650.000
Coûts de maintenance et de réparation	220.000	280.000	350.000
Frais de location	960.000	1.020.000	1.080.000
Frais d'assurance du matériel et des équipements	140.000	160.000	180.000
Frais de marketing (publicité et promotion)	180.000	220.000	260.000
Coûts de formation et d'entraînement Autres frais généraux (charges externes)	90.000	110.000	130.000
Coûts de formation et d'entraînement Autres frais généraux (charges externes)	160.000	190.000	220.000
Total	2.230.000	2.540.000	2.870.000

5.1. Estimation des coûts d'amortissement des investissements

Désignation	Durée d'amortissement	Annuité d'amortissement (DA)
Machines et équipements de production	10	625.000
Matériel roulant	5	400.000
Matériel de bureau	5	24.000
Matériel informatique	4	45.000
Matériel de télécommunication	5	10.000
Installation des équipements	10	25.000
	Montant total	1.129.000

- يطبق الاهتلاك الخطي (تحدد مدة الاهتلاك وفقا لقرار وزارة المالية المؤرخ في 14 أبريل 2025 المعدل والمتمم للقرار الصادر بتاريخ 25 فيفري 2024 الذي يحدد مدة اهتلاك التثبيات المطبقة لتحديد النتيجة الجبائية - الجريدة الرسمية عدد 29 لسنة 2025)

1- Estimation des revenus du projet

1.3 Estimation du volume des ventes annuelles

Désignation		Année 1	Année 2	Année 3
Produit / service 1 Ciment écologique (50 kg) 10%	Quantité vendue	21.840 sac	26.520 sac	31.200 sac
	Prix unitaire	410	430	450
	Valeur des ventes du produit 1	8.954.400	11.403.600	14.040.000
Produit / service 2 Ciment écologique (50 kg) 20%	Quantité vendue	31.200 sac	37.440 sac	43.680 sac
	Prix unitaire	350	370	400
	Valeur des ventes du produit 2	10.920.000	13.852.800	17.472.000
Chiffre d'affaires total		19.874.400	25.256.400	31.512.000

3.1. Calcul du résultat annuel

Désignation	Année 1	Année 2	Année 3
Chiffre d'affaires (ventes) ... (1)	19.874.400	25.256.400	31.512.000
Achats consommés ... (2)	9.600.000	12.042.000	14.658.000
Charges externes ... (3)	2.230.000	2.540.000	2.870.000
Valeur ajoutée ... (3) - (2) - (1) =(4)	8.044.400	10.674.400	13.984.000
Salaires et charges sociales ... (5)	5.400.000	6.840.000	8.640.000
Excédent brut d'exploitation ... (5) - (4) =(6)	2.644.400	3.834.400	5.344.000
Amortissements et provisions ... (7)	1.129.000	1.129.000	1.129.000
Résultat d'exploitation ... (7) - (6) =(8)	1.515.400	2.705.400	4.215.000
Impôts sur les sociétés / IFU ... (9)	0	0	0
Résultat net ... (9) - (8) =(10)	1.515.400	2.705.400	4.215.000
Évolution du chiffre d'affaires	/	20.8%	40.1%

Conclusion :

La valeur ajoutée attendue du projet pour l'économie locale et nationale Conclusion :

Le projet contribue à la création d'une valeur ajoutée aux niveaux local et national à travers la valorisation des déchets industriels et leur réutilisation dans la production d'un ciment écologique respectueux de l'environnement. Il participe également à la création de nouveaux emplois et à la dynamisation de l'activité économique locale, notamment dans les secteurs de la construction et du recyclage.

Au niveau national, le projet soutient l'orientation de l'État vers l'économie verte et le développement durable, en réduisant la pollution environnementale et la dépendance à certaines matières traditionnelles. Il permet également de fournir un produit local et économique contribuant au développement du secteur des matériaux de construction et à la promotion de la culture du recyclage.

