

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Mémoire de Master

Présenté à l'Université 8 Mai 1945 de Guelma

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de : Génie Civil & Hydraulique

Spécialité : Génie Civil

Option : STRUCTURES

Présenté par : BYCKAHOUAD Divine Odilia

Thème : L'influence d'un ajout minéral sur les performances des matériaux cimentaires

Sous la direction de : Dr. KECHKAR Chiraz

Juin 2022

Remerciements

Tout d'abord, je remercie le bon Dieu tout puissant de m'avoir donné la vie, la santé, la force, et les capacités de mener à terme ce mémoire de fin d'études.

J'adresse mes sincères remerciements et ma profonde gratitude à mon encadrante, Docteur Kechkar Chiraz pour toute l'aide qu'elle m'a apporté pour la réalisation de ce travail. Je la remercie énormément de m'avoir encadré et de m'avoir consacré tout son temps.

Je remercie les membres du Jury qui me font l'honneur d'accepter d'évaluer ce travail.

Mes remerciements à l'ensemble du corps enseignants et administratif du département de génie civil et d'hydraulique de la faculté des sciences et de la technologie de l'Université 8 Mai 45 de Guelma.

Mes remerciements également aux techniciennes du laboratoire pédagogique du département de génie civil et d'hydraulique de l'université de Guelma pour leur entière disponibilité et leur gentillesse.

Je tiens à remercier spécialement Jean Marc Pangou, pour tout le soutien qu'il m'a apporté tout au long de la rédaction de ce mémoire.

Merci à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Sur une note plus personnelle, je remercie infiniment mes très chers parents, qui ont toujours cru en moi et n'ont pas cessé de m'encourager à surmonter toutes les épreuves. Merci pour les sacrifices que vous avez faits pour que je termine mes études, pour votre amour inconditionnel et votre soutien exceptionnel malgré la distance.

RESUME

Le but de ce travail est d'étudier les propriétés physico-mécaniques et durabilité des mortiers dont une partie du ciment a été substitué par la poudre des coquilles d'œufs. Les taux de substitution sont 0, 5, 10 et 15% de la masse du ciment.

Pour atteindre cet objectif, on a comparé pour les mortiers étudiés les caractéristiques à l'état frais : ouvrabilité, masse volumique, air occlus, temps de prise et à l'état durci les propriétés physiques, mécaniques et durabilité : masse volumique, absorption d'eau par immersion total, résistance à la compression, résistance à la traction par flexion, vitesse de propagation des ondes sonores, porosité, capillarité, perméabilité à l'eau et l'attaque chimique par l'acide sulfurique H_2SO_4 .

Les résultats expérimentaux obtenus montrent que l'incorporation de la poudre des coquilles d'œufs comme substitution partielle du ciment a diminuée les propriétés mécaniques par contre elle a amélioré les propriétés physiques et la durabilité du mortier.

Mots clés : mortier – ciment - performances –déchet – recyclage – coquilles d'œufs.

ملخص

الهدف من هذا العمل هو دراسة الخواص الفيزيائية و الميكانيكية و المتانة للملاط، حيث تم استبدال جزء من الإسمنت بمسحوق قشر البيض وذلك بنسب هي 0 ، 5 ، 10 ، و 15% من كتلة الإسمنت.

لتحقيق هذا الهدف، قمنا بمقارنة بين الملاط المدروس من حيث الخصائص في الحالة الطرية: قابلية الاستخدام، الكتلة الحجمية، نسبة الهواء المحجوز و زمن الشك و الخصائص في الحالة الصلبة الخصائص الفيزيائية و الميكانيكية و المتانة: الكتلة الحجمية ، امتصاص الماء عن طريق الغمر ، مقاومة الانضغاط و الشد عن طريق الانحناء ، سرعة انتشار الأمواج الصوتية ، المسامية ، الشعيرية ، نفاذية الماء و الهجوم الكيميائي بحمض الكبريتيك H_2SO_4

أظهرت النتائج التجريبية أن إضافة مسحوق قشر البيض كبديل جزئي للإسمنت ينقص من الخواص الميكانيكية ، و من ناحية أخرى يؤدي إلى تحسين الخواص الفيزيائية و المتانة للملاط.

كلمات مفتاح: الملاط - الإسمنت - الأداء - النفايات - التدوير - قشر البيض.

ABSTRACT

The aim of this work is to study the physico-mechanical properties and durability of mortars in which part of the cement has been substituted by eggshell powder. The substitution rates are 0, 5, 10 and 15% of the cement mass.

To achieve this objective, we compared for the mortars studied the characteristics in the fresh state: workability, density, air content, setting time and in the hardened state the physical, mechanical and durability properties: density, absorption of water by total immersion, compressive strength, flexural tensile strength, ultrasonic pulse velocity, porosity, capillarity, permeability to water and chemical attack by sulfuric acid H_2SO_4 .

The experimental results obtained show that the incorporation of eggshell powder as a partial substitution of cement decreased the mechanical properties on the other hand it improved the physical properties and the durability of the mortar.

Keywords : mortar – cement – performance – waste – recycling – eggshells.

SOMMAIRE

Résumé	i
ملخص	ii
Abstract	iii
Sommaire	iv
Liste des figures	ix
Liste des tableaux	xiii
Introduction générale	1

Chapitre I : Recherche bibliographique

I.1. INTRODUCTION	3
I.2. LES DECHETS	3
I.2.1. Définition	3
I.3. LES DIFFERENTS TYPES DE DECHETS.	3
I.3.1. Déchets ultimes	3
I.3.2. Déchets ménagers et assimilés	4
I.3.3. Déchets inertes	4
I.3.4. Déchets dangereux	5
I.3.5. Déchets industriels banals (DIB)	5
I.3.6. Déchets organiques	6

I.4. IMPACT DES DECHETS DE COQUILLES D'ŒUFS SUR L'ENVIRONNEMENT	7
I.5. APPLICATIONS INDUSTRIELLES DES COQUILLES D'ŒUFS.	7
I.6. GESTION DES DECHETS	8
I.6.1. Définition	8
I.6.2. Principes de gestion des déchets	8
I.6.3. Méthodes de gestion des déchets	9
I.7. DIFFERENTS DECHETS UTILISES DANS L'ELABORATION DES BETONS ET DES MORTIERS	10
I.7.1. Les laitiers sidérurgiques	10
I.7.2. Cendres volantes	11
I.7.3. Déchets de verre	12
I.7.4. Déchets de caoutchouc	13
I.7.5. Déchets plastiques	13
I.7.6. Déchets de démolition	14
I.7.7. Déchets de coquille d'œufs	15
I.8. EFFETS DES DECHETS DE COQUILLES D'ŒUFS SUR LES PROPRIETES DES MATERIAUX CIMENTAIRES	16
I.8.1. Maniabilité	16
I.8.2. Résistance a la compression	17
I.8.3. Résistance a la traction par fendage	18
I.9. CONCLUSION	19
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	20

Chapitre II : Caractérisation des matériaux utilisés et méthodes expérimentales

II.1. INTRODUCTION	22
II.2. MATERIAUX UTILISES	22
II.3. CIMENT	23
II.4. LES COQUILLES D'ŒUFS	24
II.4.1. Préparation de la poudre de coquilles d'œufs	24
II.4.2. Caractérisation de la poudre de coquilles d'œufs	26
II.5. SABLE	28
II.5.1. Analyse granulométrique	28
II.5.2. Masse volumique	30
II.5.3. Equivalent de sable	31
II.6. EAU	33
II.7. FORMULATION DES DIFFERENTS MORTIERS POUR NOTRE ETUDE	33
II.7.1. Confections des éprouvettes	34
II.8. ESSAIS EXPERIMENTAUX REALISES SUR MORTIERS PREPARES	37
II.8.1. Essai sur mortier frais	37
II.8.1.1. Mesure de la consistance : essai d'étalement	37
II.8.1.2. Essai de prise	38
II.8.1.3. Teneur en air occlus	39
II.8.1.4. Masse volumique à l'état frais	40
II.8.2. Etude des performances des différents mortiers a l'état durci	40
II.8.2.1. Masse volumique à sec (méthode de pesée hydrostatique)	40
II.8.2.2. Essai d'absorption par immersion totale	41

II.8.2.3. Essai de compression	42
II.8.2.4. Essai de traction par flexion	42
II.8.2.5. Essai d'auscultation sonique (ultra-son)	43
II.8.2.6. Essai de porosité accessible à l'eau	44
II.8.2.7. Absorption d'eau par capillarité	45
II.8.2.8. Perméabilité à l'eau (profondeur de pénétration d'eau sous pression)	46
II.8.2.9. Essai d'attaque acide	47
II.9. CONCLUSION	48
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	49

Chapitre III : Résultats et interprétations.

III.1. INTRODUCTION	50
III.2. RESULTATS ET INTERPRETATIONS	50
III.2.1. Essais sur mortiers à l'état frais	50
III.2.1.1. Ouvrabilité : Essai d'étalement à la table à secousses	50
III.2.1.2. Essai de prise	51
III.2.1.3. Teneur en air occlus	52
III.2.1.4. Masse volumique à l'état frais	53
III.2.2. Essais sur mortiers à l'état durci	54
III.2.2.1. Masse volumique à sec (méthode de pesée hydrostatique)	54
III.2.2.2. Essai d'absorption par immersion totale	55
III.2.2.3. Résistance à la compression	56
III.2.2.4. Résistance à la traction par flexion	58
III.2.2.5. Essai d'auscultation sonique (ultra-son)	59

III.2.2.6. Essai de porosité accessible à l'eau	60
III.2.2.7. Absorption d'eau par capillarité	61
III.2.2.8. Perméabilité à l'eau (profondeur de pénétration d'eau sous pression).	62
III.2.2.9. Essai d'attaque acide	64
III.3. CONCLUSION	66
CONCLUSION GENERALE	68

LISTE DES FIGURES

Chapitre I : Recherche bibliographique

Figure I.1. Déchets de coquilles d'œufs	7
Figure I.2. Laitiers sidérurgiques	11
Figure I.3. Cendres volantes	11
Figure I.4. Déchets de verre	12
Figure I.5. Poudre de verre	12
Figure I.6. Déchets de pneus usagés	13
Figure I.7. Déchets plastiques	14
Figure I.8. Déchets de démolition	15
Figure I.9. Coquille d'œuf	15
Figure I.10. Valeur de l'affaissement en fonction du taux de substitution	16
Figure I.11. Résultat d'affaissement du béton	17
Figure I.12. Variation de la résistance à la compression en fonction du taux de substitution a l'âge de 7 et 28 jours	18

Chapitre II : Caractérisation des matériaux utilisés et méthodes expérimentales

Figure II.1. Matériaux utilisés	23
Figure II.2. Préparation de la poudre des coquilles d'œufs	25
Figure II.3. Appareil granulométrie laser utilisé	26
Figure II.4. Résultat de la granulométrie laser	26

Figure II.5. Essai masse volumique absolue	27
Figure II.6. Appareil de Blaine automatique	28
Figure II.7. Tamiseuse électrique	28
Figure II.8. Courbe granulométrique du sable utilisé	29
Figure II.9. Masse volumique absolue	30
Figure II.10. Equivalent de sable	32
Figure II.11. Diagrammes à secteurs de la formulation des mortiers d'étude	34
Figure II.12. Malaxeur à mortier	35
Figure II.13. Moules graissées avec de l'huile	35
Figure II.14. Remplissage des moules	36
Figure II.15. Conservation des éprouvettes dans l'eau	36
Figure II.16. Table à secousses	38
Figure II.17. Essai de prise	39
Figure II.18. Teneur en air occlus	39
Figure II.19. Masse volumique à l'état frais	40
Figure II.20. Pesée hydrostatique	41
Figure II.21. Appareil d'essai de compression	42
Figure II.22. Appareil pour essai de traction par flexion	43
Figure II.23. Appareil d'auscultation sonore	44
Figure II.24. Dispositif de l'essai de capillarité	46
Figure II.25. Perméabilimètre à l'eau	47
Figure II.26. Acide sulfurique utilisé	48
Figure II.27. Conservation des éprouvettes dans la solution d'acide sulfurique	48

Chapitre III : Résultats et interprétations.

Figure III.1. Essai d'étalement pour le mortier MC5%	50
Figure III.2. Valeurs d'étalement des 04 mortiers étudiés	51
Figure III.3. Valeurs du temps de début et fin de prise	52
Figure III. 4. Valeurs de l'air occlus	53
Figure III.5. Valeurs de la masse volumique	54
Figure III.6. Valeurs de la masse volumique à l'état durci	55
Figure III.7. Valeurs de l'absorption par immersion totale pour les 04 formulations	56
Figure III.8. Essai de compression	57
Figure III.9. Valeurs de la résistance à la compression à 7 et 28 jours pour les 04 formulations du mortier étudié	57
Figure III.10. Essai de traction par flexion	58
Figure III.11. Valeurs de la résistance à la traction par flexion à 7 et 28 jours pour les 04 formulations du mortier étudié	58
Figure III.12. Essai d'auscultation sonore	59
Figure III.13. Valeurs de la vitesse ultrasonique pour les 04 mortiers étudiés	60
Figure III.14. Valeurs de la porosité accessible à l'eau	61
Figure III.15. Variation de l'absorption capillaire en fonction du temps	62
Figure III.16. Essai d'absorption d'eau par capillarité	62
Figure III.17. Essai de perméabilité à l'eau	63
Figure III.18. Profondeur de la pénétration d'eau pour les 04 formulations du mortier d'étude	63
Figure III.19. Mesure de la profondeur de la pénétration d'eau pour les mortiers MO, MC10%, MC15%	64

Figure III.20. Variation de la masse des mortiers en fonction du temps d'immersion dans l'acide sulfurique	65
Figure III.21. L'allure des éprouvettes des 04 compositions du mortier Après 56 jours d'immersion dans la solution H_2SO_4	66

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre I : Recherche bibliographique

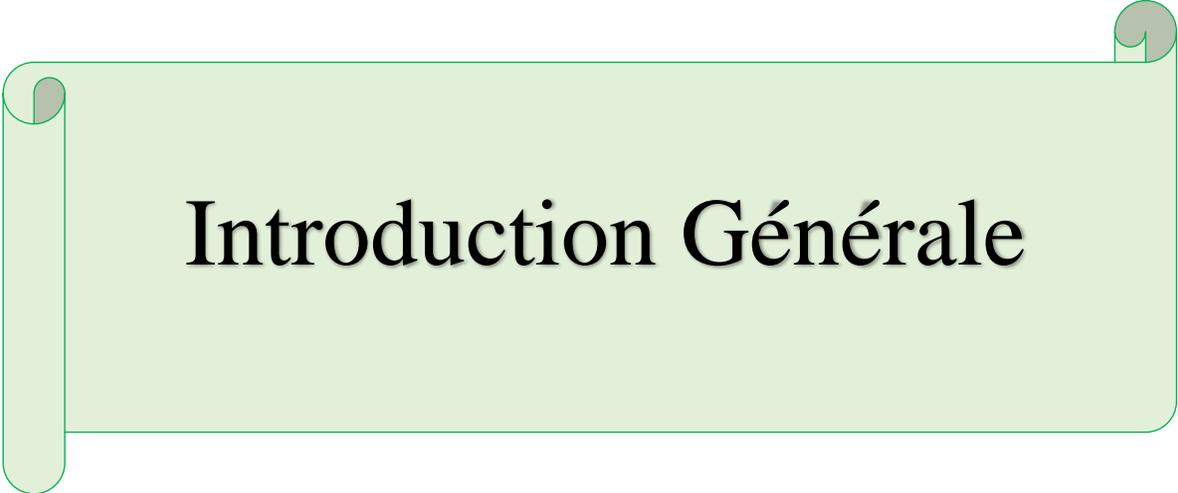
Tableau I.1. Résistance à la compression du béton	17
Tableau I.2. Résistance à la traction fendue du béton	18

Chapitre II : Caractérisation des matériaux utilisés et méthodes expérimentales

Tableau II.1. Composition chimique moyenne du ciment CPJ-CEM II utilisé	23
Tableau II.2. Propriétés physiques du ciment utilisé	23
Tableau II.3. Composition chimique de la poudre de coquilles d'œufs	27
Tableau II.4. Propriétés physiques de la poudre de coquilles d'œufs	27
Tableau II.5. Résultats de l'analyse granulométrique du sable	29
Tableau II.6. Valeurs des masses volumiques.	31
Tableau II.7. Qualité du sable en fonction des valeurs d'équivalent de sable ESV et ES	32
Tableau II.8. Résultats de l'équivalent de sable	32
Tableau II.9. Compositions des différents mortiers	33
Tableau II.10. Valeurs d'étalement	37
Tableau II.11. Corrélation entre la vitesse du son et la qualité du matériau	44

Chapitre III : Résultats et interprétations

Tableau III.1. Valeurs d'étalement	50
Tableau III.2. Valeurs d'essai début et fin de prise	51
Tableau III.3. Valeurs de l'air occlus	52
Tableau III.4. Valeurs de la masse volumique	53
Tableau III.5. Valeurs de la masse volumique à sec	54
Tableau III.6. Valeurs de l'absorption par immersion totale	55
Tableau III.7. Valeurs de la résistance à la compression	56
Tableau III.8. Valeurs de la résistance à la traction par flexion	58
Tableau III.9. Valeurs de l'auscultation sonore	59
Tableau III.10. Valeurs de la porosité accessible à l'eau	60
Tableau III.11. Valeurs d'absorption capillaire en fonction du temps	61
Tableau III.12. Valeurs de profondeur de pénétration d'eau	63
Tableau III.13. Valeurs de la perte en masse des différents des mortiers étudiés	65



Introduction Générale

INTRODUCTION GENERALE

Ces dernières années, l'industrie de la construction s'est développée à un rythme assez rapide dans le monde, ce qui engendre une augmentation de la demande du béton et du mortier. Cependant cette utilisation massive du béton et du mortier s'est accompagnée d'une grande demande sur la production du ciment qui est le composant principal de ces matériaux.

Le procédé de production du ciment Portland est très intensif, requiert énormément d'énergie et contribue d'une manière significative à l'émission du dioxyde de carbone CO_2 dans l'atmosphère. Elle dégage près d'une tonne de CO_2 , pour chaque tonne de ciment produite. Ces émissions sont dues principalement à la consommation des combustibles lors de la cuisson du calcaire et de l'argile ainsi aux émissions générées par la réaction chimique nécessaire à la fabrication du clinker.

À l'heure actuelle, la protection de l'atmosphère et l'environnement fait partie des occupations majeures des chercheurs, Dont l'une des solutions est la réduction de la production du ciment et la valorisation des sous-produits et des déchets.

Cette idée de réutilisation des déchets dans la fabrication des matériaux de construction permet non seulement de réduire la production du clinker, l'un des composants essentiels du ciment Portland, mais aussi de mieux gérer les grandes quantités de déchets générées et accumulées dans les décharges ; car l'accumulation de ces déchets ont des conséquences néfastes sur la santé et l'environnement.

Dans ce contexte, les laboratoires de recherche sur les matériaux travaillent sur le développement de nouveaux composites cimentaires à base de ces déchets, dans le but économique (réduire le coût de réalisation), écologique (éliminer ces déchets de l'environnement) et technique (améliorer les propriétés mécaniques et physiques des mortiers ou des bétons).

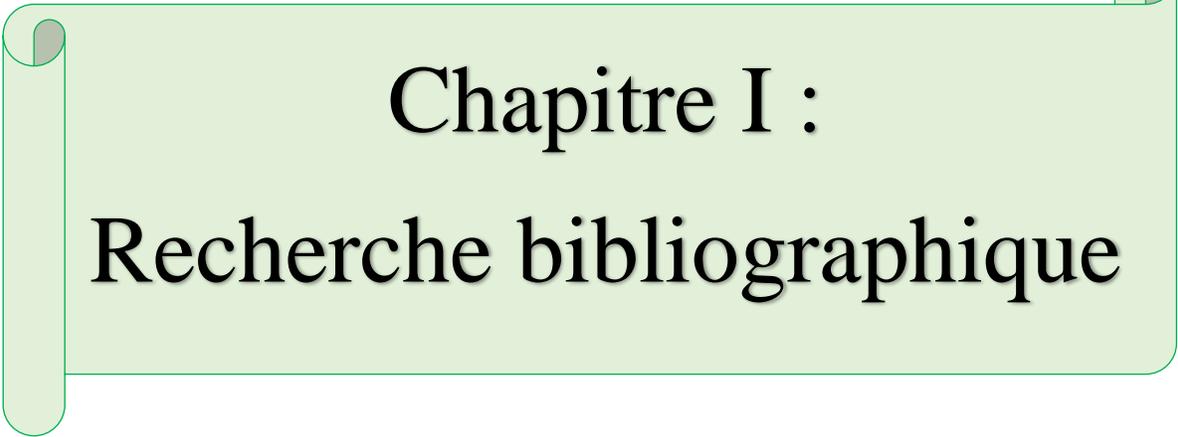
Parmi ces déchets, les coquilles d'œufs de poule broyés utilisés comme ajouts pour la fabrication des mortiers. Selon l'Association nationale des commerçants et artisans (ANCA), plus de 5 milliards d'œufs ont été consommés en Algérie durant l'année 2017.

L'objectif de ce travail est d'étudier l'influence de l'ajout des coquilles d'œufs de poule comme substituant partiel du ciment sur les caractéristiques physiques, mécaniques et la durabilité du mortier.

Ce mémoire commence par une introduction générale, et se subdivise en trois chapitres structurés comme suit :

- Le premier chapitre présente une synthèse bibliographique sur les déchets et leur gestion, les déchets recyclés dans le domaine du Génie civil pour l'élaboration des bétons et mortiers, ainsi qu'une synthèse sur les travaux déjà réalisés sur l'utilisation des déchets de coquilles d'œufs dans la production des matériaux cimentaires.
- Le deuxième chapitre présente une description des matériaux utilisés pour la confection des mortiers et leurs caractéristiques, ainsi que le programme expérimental réalisé.
- Le troisième chapitre concerne la présentation des résultats et interprétations des essais réalisés sur les différentes formulations des mortiers étudiés.

Nous terminerons ce mémoire par une conclusion générale de nos travaux, ainsi que des perspectives qui en découlent sur les améliorations nécessaires à apporter, en proposant des études possibles à réaliser comme suite aux travaux présentés.



Chapitre I :

Recherche bibliographique

CHAPITRE I

RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

I.1. INTRODUCTION :

Ce chapitre a pour objet de présenter une synthèse bibliographique sur les déchets, les principes de gestion de ces déchets et les différents déchets recyclés dans le domaine du Génie civil pour l'élaboration des bétons et des mortiers.

Il est particulièrement orienté sur le déchet de coquille d'œuf qui fait l'objet de ce travail, sur son impact environnemental, son application industrielle ainsi que sur son influence comme ajout au ciment sur les caractéristiques principales des bétons.

I.2. LES DECHETS :

I.2.1. Définition :

Un déchet est défini comme tout résidu d'un processus de production, de transformation, ou d'utilisation, toute substance, matériau produit ou plus généralement tout bien meuble abandonné ou que son détenteur destine à l'abandon et qui est de nature à produire des effets nocifs sur le sol, la flore et la faune, à dégrader les sites ou les paysages, à polluer l'air ou les eaux, à engendrer des bruits ou des odeurs. D'une façon générale, à porter atteinte à la santé de l'homme et à l'environnement [1].

I.3. LES DIFFERENTS TYPES DE DECHETS :

I.3.1. Déchets ultimes :

Un déchet ultime est défini comme un déchet, qui n'est plus susceptible d'être traité dans les conditions techniques et économiques du moment, notamment par extraction de la part valorisable ou par réduction de son caractère polluant ou dangereux. Les déchets ultimes sont

ceux situés en bout de chaîne de traitement, c'est-à-dire que leurs caractères polluants ou dangereux ne sont plus à même d'être réduits davantage. De la même manière, leurs parts valorisables ne sont plus économiquement et/ou techniquement extractibles. Ils doivent être éliminés [2].

Il s'agit le plus souvent de véhicules hors d'usage, de déchets médicaux, de peintures, solvants, de déchets radioactifs, d'encombrants (canapés, meubles ou autres vieux objets) et les gravats qui ne sont pas ou plus valorisables [3].

I.3.2. Déchets ménagers et assimilés :

Les déchets assimilés aux ordures ménagères sont les déchets non dangereux provenant des activités économiques de l'artisanat, des commerces, des bureaux et petites industries, ou d'établissements collectifs (éducatifs, socioculturels, militaires, pénitentiaires, etc.), pouvant utiliser les mêmes circuits d'élimination que les déchets non dangereux des ménages [4].

I.3.3. Déchets inertes :

Déchet qui ne subit aucune modification physique, chimique ou biologique importante ; ne se décompose pas, ne brûle pas, et ne produit aucune réaction physique ou chimique, ne sont pas biodégradable et ne détériore pas d'autres matières avec lesquelles il entre en contact, d'une manière susceptible d'entraîner une pollution de l'environnement ou de nuire à la santé humaine.

Ces déchets sont admissibles dans les installations de stockage et proviennent essentiellement des chantiers de bâtiment et de de travaux publics ou d'industries de fabrication de matériaux de construction.

Ce sont les déchets suivants : les bétons, les tuiles et les céramiques, les briques, les déchets de verre, les terres, les enrobés bitumeux [4].

I.3.4. Déchets dangereux :**a. Déchets industriels spéciaux (DIS) :**

Ces déchets figurent en raison de leurs propriétés dangereuses, exemple : déchets contenant de l'arsenic, du plomb ; constitués de boues de peinture, d'hydrocarbures ; provenant de l'industrie pétrolière, etc.... [1]

b. Déchets ménagers spéciaux (DMS) :

Ce sont les déchets à risque contenus dans les déchets ménagers, tels que les aérosols, colles, détergents, détachants insecticides, peintures, piles, tubes néon, produits de nettoyage.

Il peut s'agir de ce qu'on appelle également les DTQS : déchets toxiques en quantité dispersé [1].

I.3.5. Déchets industriels banals (DIB) :

Ils regroupent l'ensemble des déchets non dangereux produits par les industriels et par les entreprises du commerce, de l'artisanat, des services et de l'administration, de la métallurgie, la peinture, la chimie et la pétrochimie. Ce sont des déchets d'emballage, des déchets d'entretien et les matériels en fin de vie.

Les déchets non dangereux et non inertes, dits industriels banals sont de même nature que les ordures ménagères.

Ce sont :

- Les bois non traités ou traités avec des produits non dangereux (emballages, coffrages, menuiseries, planchers...),
- Les plastiques en PVC, polystyrène, polypropylène (canalisations, menuiseries, revêtements de sols, emballages...),
- Les métaux ferreux et non ferreux tels que l'aluminium, le cuivre, l'acier, le zinc (toitures, matériels électriques, canalisations, équipements...),
- Les revêtements muraux et de sol textiles,
- Le polystyrène expansé, le polyuréthane,
- Les produits mélangés issus de chantier de réhabilitation...

- Les peintures, vernis, colles, mastics, qui ne comprennent ni solvants organiques, ni substances dangereuses [1].

I.3.6. Déchets organiques :

Les déchets organiques sont des déchets provenant de matières d'origine animale ou végétale. Les déchets organiques sont des déchets alimentaires, déchets verts, déchets agricoles, déchets issus des industries agroalimentaires ou de la restauration, et composent une grande partie des déchets ménagers.

Il s'agit de :

- Déchets alimentaires (coquilles d'œufs, épluchures, fruits et légumes même abimés, marc de café avec filtre, thé, pain)
- Déchets de maison (cheveux, ongles, plumes, poils cendres de tabac, papier journal, mouchoirs en papier, coton, sachets d'emballage en papier)
- Déchets verts (feuilles mortes, tonte de gazon, fleurs fanées...) [5].

Déchets de coquille d'œufs :

Les coquilles d'œufs sont récupérées généralement des déchets de restauration et de transformation des aliments. La coquille d'œuf de poule est un déchet peu coûteux et abondant qui présente des caractéristiques intéressantes pour de nombreuses applications potentielles [6].

La coquille d'œuf est constituée à 95,1 % d'éléments minéraux, notamment de carbonate de calcium sous forme de calcite cristallisée, mais aussi 3,3 % de protéines qui constituent la trame initiale de la coquille et de 1,6 % d'eau [7].

Etant formée principalement de carbonate de calcium ($CaCO_3$), la coquille d'œuf est largement utilisée comme aliment pour animaux, comme substitut de chaux ($Ca(OH)_2$) ou comme engrais [6].



Figure I.1. Déchets de coquilles d'œufs [8].

I.4. IMPACT DES DECHETS DE COQUILLES D'ŒUFS SUR L'ENVIRONNEMENT :

Les déchets de coquilles d'œufs contiennent toujours des membranes et des restes de blanc et de jaune d'œuf. Leurs principaux impacts environnementaux sont le risque de propagation d'agents pathogènes comme les salmonelles (*salmonella*) qui provoquent chez l'espèce humaine des maladies telles que la fièvre typhoïde, la fièvre paratyphoïde et la salmonellose ; l'émission d'odeurs désagréables et la production de lixiviats dans les décharges [9].

I.5. APPLICATIONS INDUSTRIELLES DES COQUILLES D'ŒUFS [9] :

Les coquilles d'œufs ont une teneur élevée en carbonate de calcium et un faible pourcentage de matière organique. Ainsi, la valorisation de ces déchets serait à la fois bénéfique sur le plan environnemental et économique.

Les applications industrielles se divisent en deux catégories : celles qui utilisent les coquilles comme matières premières et celles qui l'utilisent comme catalyseur ou sorbant.

Dans le premier cas il peut servir à produire un biomatériau composite pour des implants orthopédiques et dentaires ; et peut être un additif alimentaire pour l'homme ou les animaux.

Dans le second cas, il peut être utilisé comme catalyseur dans la production de biodiesel, l'isomérisation du lactose ou la synthèse du carbonate de diméthyle. Et comme sorbant pour l'élimination ou l'immobilisation de polluants dans l'air, les sols ou les liquides.

I.6. GESTION DES DECHETS :

I.6.1. Définition :

La gestion des déchets est la collecte, le transport, le traitement, la réutilisation ou l'élimination des déchets, habituellement ceux produits par l'activité humaine, afin de réduire leurs effets sur la santé humaine ou l'environnement. L'accent a été mis, ces dernières décennies, sur la réduction de l'effet des déchets sur la nature et l'environnement et sur leur valorisation.

La gestion des déchets concerne tous les types de déchets, qu'ils soient solides, liquides ou gazeux, chacun possédant sa filière spécifique. Les manières de gérer les déchets diffèrent selon qu'on se trouve dans un pays développé ou en voie de développement, dans une ville ou dans une zone rurale, que l'on ait affaire à un particulier, un industriel ou un commerçant.

La gestion des déchets non toxiques pour les particuliers ou les institutions dans les agglomérations est habituellement sous la responsabilité des autorités locales, alors que la gestion des déchets des commerçants et industriels est sous leur propre responsabilité [1].

Différentes lois, notamment celles de la directive européenne du 15 juillet 1975 et du 3 juillet 1992 regroupée et inscrite dans le code de l'environnement, fixent les objectifs à respecter pour gérer correctement les déchets :

- Prévenir ou réduire la production et la nocivité des déchets.
- Organiser le transport des déchets.
- Valoriser les déchets par réemploi, recyclage ou toute action visant à obtenir des matériaux réutilisables ou de l'énergie.
- Informer le public des effets pour l'environnement et la santé publique.
- Limiter le stockage définitif aux seuls déchets résiduels, ultimes [10].

I.6.2. Principes de gestion des déchets :

Plusieurs principes guident la gestion des déchets dont l'usage varie selon les pays ou les régions.

La hiérarchie des stratégies (règle des trois R) :

- **R**éduire
- **R**éutiliser
- **R**ecycler

La hiérarchie des stratégies a plusieurs fois changé d'aspect ces dix dernières années, mais le concept sous-jacent est demeuré la pierre angulaire de la plupart des stratégies de gestion des déchets : utiliser au maximum les matériaux et générer le minimum de rebuts.

Certains experts en gestion des déchets ont récemment ajouté un «quatrième R» : «Repenser», qui implique que le système actuel présente des faiblesses et qu'un système parfaitement efficace exigerait qu'un regard totalement différent soit porté sur les déchets [1].

I.6.3. Méthodes de gestion des déchets [1] :

La gestion des déchets consiste en la détermination du type de traitement à appliquer à telle ou telle autre catégorie des déchets. Certes pour assurer une bonne gestion des déchets, il faut mettre des moyens sur le plan financier que matériel, par conséquent, la bonne gestion limitera les dégâts sanitaires. C'est ainsi que nous allons examiner successivement les différents modes de gestion des déchets.

Ces méthodes sont actuellement au nombre de cinq (05) :

a. L'enfouissement :

C'est une méthode d'évacuation des déchets organiques qui consiste à creuser une fosse profonde de 0,5 à 1m pour y verser des déchets, asperger de l'essence et la couvrir d'une couche de terre afin de brûler sans fumée les déchets. Ce procédé utilise comme produits désinfectants ou désodorisants le chlore, la chaux, le mazout, et l'essence.

b. L'incinération :

C'est un procédé urbain d'élimination finale des déchets qui consiste à brûler au moyen d'un feu les déchets produits par les hôpitaux. Les procédés de l'incinération comprennent le ramassage des déchets et ordures, le triage pour dissocier les déchets combustible et non combustible. Elle peut être considérée comme un procédé par l'excellence de traitement des immondices, c'est une méthode satisfaisante qui présente cependant quelques inconvénients, parmi lesquels on peut citer :

Elle nécessite une évacuation des cendres après son exécution,

Elle provoque un danger de pollution de l'environnement par sa fumée,

Elle nécessite un investissement et un coût d'exploitation élevés pour sa construction.

c. La décharge contrôlée :

La décharge contrôlée est un dépotoir public prévu à l'avance pour l'évacuation des immondices ménagères. Elle a l'avantage d'offrir des éléments pour l'alimentation des jardins ou des plantations d'arbres. Cette méthode n'est pas conseillée pour le traitement des déchets hospitaliers.

d. Le compostage :

Le compostage est un procédé de décomposition des matières organiques usée de manière à le récupérer sous une autre forme permettant une utilisation ultérieure comme engrais.

Il nécessite la préparation suivante : réception des ordures, triage des ordures, préparation des compostes, décomposition, présentation du produit fini.

e. Le recyclage :

Etant donné que tout ce qui est brûlé est irrémédiablement perdu en tant que matière première, c'est ainsi que le recyclage, qui a pour avantage de réduire la consommation en matière première pour la fabrication de nouveau bien, permet de minimiser l'impact en environnemental des déchets. Afin que les déchets recyclables puissent être effectivement recyclés, il est nécessaire qu'un pré-tri soit effectué en amont.

Cette opération a pour objectif principal d'éviter un souillage des déchets recyclables par des déchets non recyclables. En effet, ceci pourrait les rendre impropres au recyclage. D'autre part, il permet d'orienter les différents déchets vers la bonne destination.

I.7. DIFFERENTS DECHETS UTILISES DANS L'ELABORATION DES BETONS ET DES MORTIERS :**I.7.1. Les laitiers sidérurgiques :**

Le laitier de haut fourneau est un sous-produit de la transformation du minerai de fer en fonte brute [1]. Les laitiers sidérurgiques sont des matières minérales artificielles. Ces matériaux sont générés en même temps que la fonte sidérurgique (pour les laitiers de haut-fourneau) ou que l'acier (laitiers d'aciérie), sous forme liquide à une température proche de 1500°C : ce sont des coproduits de la sidérurgie.

Ils sont transformés, le plus souvent directement sur le site sidérurgique, en divers produits finis qui sont utilisés pour la plupart dans l'industrie du bâtiment ou en travaux publics [11].

Actuellement, un très grand nombre de cimenteries fabriquent des liants hydrauliques contenant des teneurs variées en laitier (ciments normalisés où des ciments spéciaux).

L'emploi du laitier granulé en cimenterie est doublement important, car il permet à la fois des économies considérables d'énergie (réduction du combustible de 30 à 40 %), et permet d'obtenir des ciments présentant des propriétés variées.



Figure I.2. Laitiers sidérurgiques. [12].

I.7.2. Cendres volantes :

Les cendres volantes sont le résidu finement divisé résultant de la combustion du charbon pulvérisé. Elles constituent un produit minéral pulvérulent, consécutif du dépoussiérage des fumées rejetées par les centrales thermiques, qui utilisent du charbon broyé comme combustible. Ces cendres sont obtenues par précipitation électrostatique ou mécanique de particules pulvérulentes contenues dans les gaz de fumée des chaudières. Elles constituent une matière première intéressante pour la fabrication de certains ciments, voire pour la formulation de bétons [13]. Les cendres volantes pourraient constituer de très bons granulats légers, mais elles ne sont pas beaucoup utilisées. Elles sont préférables à beaucoup d'autres granulats légers étant donné qu'elles donnent une combustion plus efficace [1].



Figure I.3. Cendres volantes [13].

I.7.3. Déchets de verre :

Le verre est un corps solide, non cristallin, homogène, provenant du refroidissement progressif de certaines substances après fusion. Le verre est l'un des matériaux les plus utiles car il possède de nombreuses qualités. Il est facile à modeler, transparent et peut prendre de nombreuses formes.

Des millions de tonnes de verre sont récupérées chaque année et une voie de recyclage du verre consiste à l'utiliser dans les matériaux de construction. Il est utilisé sous deux formes principales : les granulats (taille $> 4\text{mm}$) et les poudres (taille $< 4\text{mm}$). Les granulats sont utilisés en remplacement des graves dans les bétons et lui procurent une résistance moindre.

Les poudres sont utilisées dans les mortiers en remplacement du sable mais aussi dans l'industrie du ciment comme fines [1]. Du fait de sa nature amorphe et qu'il contient des quantités relativement appréciables de silice, le verre est en général considéré comme étant pouzzolanique s'il est finement broyé. Ainsi il pourrait être utilisé en remplacement du ciment Portland dans les bétons [14].



Figure I.4. Déchets de verre [1].



Figure I.5. Poudre de verre [14].

I.7.4. Déchets de caoutchouc :

Il existe deux grandes familles de caoutchoucs :

- Les caoutchoucs naturels qui proviennent de l'hévéaculture (hévéa : arbre qui produit du latex),
- Les caoutchoucs synthétiques fabriqués à partir de dérivés du pétrole.

Les caoutchoucs sont utilisés dans de nombreux secteurs : automobile/transport (pneumatiques, système de freinage, airbag, étanchéité, ...), équipement industriel, bâtiment et travaux publics (BTP), médical, colles et adhésifs...

L'incorporation de granulats en caoutchouc issus du broyage de pneus usagés dans un mortier confère au composite obtenu une plus grande capacité de déformation avant localisation de la macro fissure. Il en résulte que le composite cimentaire incorporant des granulats en caoutchouc a une grande résistance à la fissuration dû au retrait [1].



Figure I.6. Déchets de pneus usagés [1].

I.7.5. Déchets plastiques :

Ce sont les résidus de processus de production, de transformation et de consommation, ou encore les produits plastiques destinés à l'abandon. Les déchets plastiques peuvent incorporés dans des matrices cimentaires. En effet, des études antérieures ont montrées qu'il était possible d'utiliser les déchets plastiques dans les bétons comme liant pour la production d'un matériau composite à haute performance ou sont ajoutés dans le béton (sous forme de grains et fibres ondulées et rectilignes).

Il existe plusieurs types de déchets plastiques à savoir :

- Les déchets plastiques industriels : il s'agit de l'ensemble des déchets issus des processus de production de résines (essentiellement trouvés dans les sites pétrochimiques) et de transformation des résines en objets fins (principalement trouvé dans la filière de la plasturgie),
- Les déchets de production : ils proviennent des arrêts de réacteur de polymérisations, des purges de réacteurs et des lots déclassés. Ils sont homogènes et présentent la particularité d'avoir un degré de pollution faible, voire inexistant. On y retrouve, en très grand majorité, les polymères de grande diffusion (Polyéthylène, polystyrène, polychlorure de vinyle),
- Les déchets de transformation : ils proviennent de toutes les opérations de plasturgie permettant l'obtention de produits finis (extrusion, injection, soufflage, calandrage, ...). On y retrouve, précisément, les carottes, lisières et bordures de ces opération de thermoformage, les pièces présentant des défauts, ou encore, les chutes de démarrage et d'arrêt de machine [1].



Figure I.7. Déchets plastiques [1].

I.7.6. Déchets de démolition :

Les déchets de démolition sont des déchets provenant de la démolition de bâtiments, de routes, de ponts ou d'autres structures [15]. Le béton constitue presque 75%, en poids de tous les matériaux de construction. Il s'ensuit donc que la plus grande partie de rebuts de démolition est constituée de béton.

Aujourd'hui, les producteurs de granulats recyclés ont une politique de sélection des matériaux de démolition. Ainsi, on distingue cinq catégories de matériaux de démolition en fonction de leur nature :

- Les bétons armés sans enduit ni plâtre.
- Les matériaux composés de briques, de tuiles, de graves, de pierres et de blocs rocheux, etc.
- Les matériaux mélangés avec une faible teneur en plâtre, bois, plastique, etc.
- Les mauvais matériaux avec une teneur en bois, plâtre, plastique : supérieure à 10% [1].



Figure I.8. Déchets de démolition [16].

I.7.7. Déchets de coquille d'œufs :

Dans le cas de génie civil, la coquille d'œuf peut servir à produire du carbonate de calcium purifié pour application dans le bâtiment comme matériau de construction ou comme ajout dans le ciment ou le mortier [9].



Figure I.9. Coquille d'œuf [17].

I.8. EFFETS DES DECHETS DE COQUILLES D'ŒUFS SUR LES PROPRIETES DES MATERIAUX CIMENTAIRES :

Hormis quelques tentatives, les études sur l'utilisation des coquilles d'œufs sont très peu vulgarisées dans le domaine de la construction.

I.8.1. Maniabilité :

La maniabilité des mortiers et bétons est l'une des principales propriétés à l'état frais. **Jhatial A.A. et al [18]** dans leur étude sur l'influence de la substitution partielle du ciment par la poudre de coquilles d'œuf sur l'ouvrabilité des bétons ont remarqué qu'elle diminue avec l'augmentation du taux de substitution (figure I.10).

De même pour **Tan Y.Y. et al [19]**, ils ont remarqué que l'ouvrabilité des bétons diminue avec l'augmentation du taux du substitution du ciment par la poudre de coquilles d'œufs jusqu'au taux de 15% ; au-delà de 15% l'ouvrabilité augmente (figure I.11).

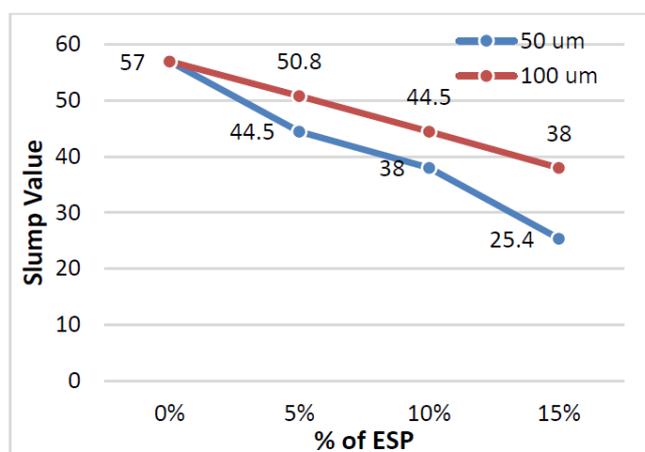


Figure I.10. Valeur de l'affaissement en fonction du taux de substitution [18].

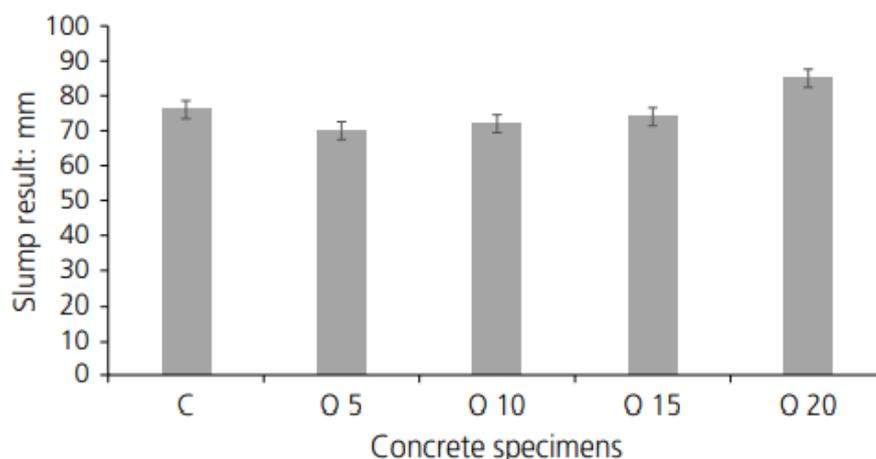


Figure I.11. Résultat d'affaissement du béton [19].

I.8.2. Résistance à la compression :

La résistance à la compression est l'une des propriétés les plus importantes lors de la caractérisation des matériaux cimentaire. **Amarnath Y. et al [20]** dans leurs études sur le béton ont remplacé 5%, 10% et 15% de la masse du ciment par la poudre des coquilles d'œufs. Ils ont constaté que pour un taux de substitution de 5% la résistance à la compression du béton à différents âges a augmenté. Par exemple, à l'âge de 7 jours, la résistance à la compression a augmenté de 11.1 MPa pour le béton ordinaire à 14.4 MPa pour le béton à 5% de taux de substitution. De même pour l'âge de 28 jours, la résistance à la compression a augmenté de 22.3 MPa pour le béton ordinaire à 24 MPa pour le béton à 5% de taux de substitution (Tableau I.1). Donc, une augmentation de 29.7% et 7.6% à l'âge de 7 jours et 28 jours respectivement.

Tableau I.1. Résistance à la compression du béton [20].

Béton	Résistance en compression (MPa)		
	1 jour	7 jours	28 jours
Ordinaire	6.8	11.1	22.3
Avec 5 % de coquilles	4.9	14.4	24
Avec 10 % de coquilles	7.7	10,7	18.9
Avec 15 % de coquilles	6.9	9.8	16.1

Une autre étude réalisée par **Divya B. et al [21]** sur l'effet de la substitution d'une partie du ciment par la poudre des coquilles d'œufs sur la résistance à la compression du béton, a montré

que la résistance à la compression augmente avec l'augmentation du taux de substitution jusqu'à 15%, au-delà de 15%, elle commence à diminuer. Ils ont constaté qu'un taux de substitution de 15% fait augmenter la résistance à la compression à 28 jours de 8% par rapport au béton ordinaire (figure I.12).

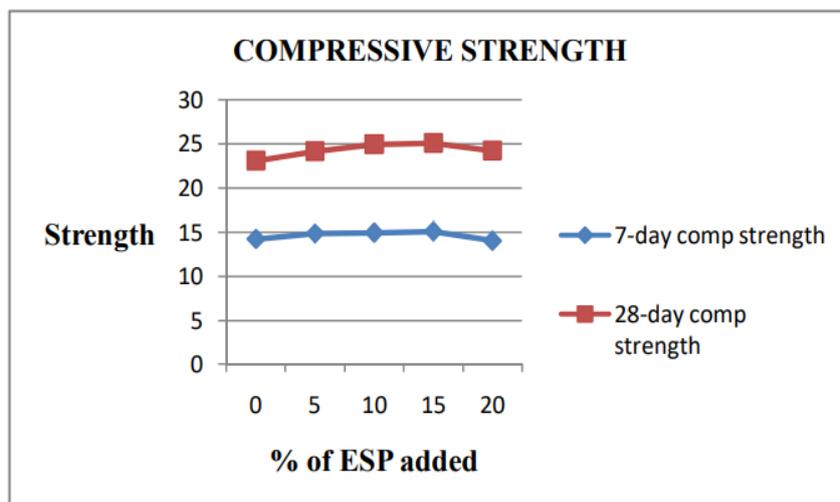


Figure I.12. Variation de la résistance à la compression en fonction du taux de substitution à l'âge de 7 et 28 jours. [21].

I.8.3. Résistance à la traction par fendage [20] :

Pour l'essai de traction par fendage, **Amarnath Y. et al [20]** ont montré que jusqu'à un taux de substitution de 10% du ciment par la poudre de coquilles d'œufs et à l'âge de 28 jours, les bétons modifiés ont presque la même résistance à la traction par fendage que le béton ordinaire. Elle a diminué pour un taux de substitution de 15% (Tableau I.2).

Tableau I.2. Résistance à la traction fendue du béton [20].

Béton	Résistance à la traction fendue (MPa)		
	1 jour	7 jours	28 jours
Ordinaire	0.4	0.8	2.4
Avec 5 % de coquilles	0	1.3	2.4
Avec 10 % de coquilles	0.2	1	2.3
Avec 15 % de coquilles	0	1.4	1.6

I.9. CONCLUSION :

Cette étude bibliographique a permis de multiplier nos connaissances sur les déchets en général et le déchet de coquilles d'œufs en particulier ; de mettre un point sur la possibilité de valorisation de certains de ces déchets dans le secteur du génie civil afin de contribuer à la diminution de rejet de ces déchets dans l'environnement.

Ainsi, la valorisation des déchets des coquilles d'œufs en tant que matériau cimentaire pourrait avoir plusieurs avantages que ce soit sur le plan économique et environnemental.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES :

[1] **LARIBI Islam, BOURAHDOUN Nassereddine** : « *Valorisation des déchets dans le béton auto plaçant : État de l'art* ». Mémoire de master Génie Civil, Matériaux en Génie Civil. Université 8 Mai 1945 – Guelma -, 2020.

[2] https://fr.wikipedia.org/wiki/Déchet_ultime (Consulté le 16.02.2022)

[3] <https://www.leparisien.fr/environnement/ma-fiche-ecolo-pratique-dechets-ultimes-a-reduire-d-urgence-24-06-2015-4887017.php> (Consulté le 16.02.2022)

[4] **BOUCHELACHEM Khawla** : « *Caractérisation des matériaux cimentaires à base de granulats de caoutchouc* ». Mémoire de master Génie Civil, Structures. Université 8 Mai 1945 – Guelma -, 2021.

[5] www.vedura.fr/environnement/dechets/dechets-organiques (Consulté le 16.02.2022)

[6] **OUDJIT Med Nadir, TLILI Zoubir** : « *Elimination de bleu de méthylène par un matériau naturel. Mémoire de master Chimie, Chimie analytique* ». Université Mohamed Chérif Messadia - Souk Ahras -, 2021.

[7] https://fr.wikipedia.org/wiki/Coquille_d%27%C5%93uf (Consulté le 12.03.2022)

[8] https://www.google.com/search?q=dechets+de+coquilles+d%27oeufs&client=avast-a-1&sxsrf=ALiCzsafGtzt-1BpggEFPia_NHQXCwbP-Q:1652457742791&source=lnms&tbn=isch&sa=X&ved=2ahUKEwjZsY_m7Nz3AhX4SvE_DHVvkCA0Q_AUoAXoECAEQAw&biw=1344&bih=608&dpr=1#imgrc=y1vfMN6hIT_q9M (Consulté le 12.03.2022)

[9] <https://www.techniques-ingenieur.fr/actualite/articles/la-coquille-doeuf-symbole-de-leconomie-circulaire-45966/> (Consulté le 14.03.2022)

[10] **TALEB, Karina** : « *Etude à l'état frais et à l'état durci de l'influence des fines de mortiers de démolition sur les propriétés des mortiers* ». Mémoire de master Génie Civil, Structure et Matériaux. Université Mouloud Mammeri - Tizi Ouzou -, 2016.

[11] <https://www.ctpl.info/les-laitiers-siderurgiques/> (Consulté le 16.03.2022)

[12] https://www.ctpl/wp-content/uploads/2019/03/laitiers_LAC.jpg (Consulté le 16.03.2022)

[13] <https://www.acpresse.fr/les-cendres-volantes/> (Consulté le 17.03.2022)

[14] **ATallah Abdallah, Anichel Noureddine** : « *Effets du filler calcaire et filler du gravier roule sur la durabilité des mortiers exposés aux attaques chimiques* ». Mémoire de master Génie Civil, Structure et Matériaux. Université De Ghardaïa, 2020.

[15] https://fr.wikipedia.org/wiki/Déchet_de_démolition (Consulté le 17.03.2022)

[16] https://www.usinenouvelle.com/mediatheque/5/5/1/000774155_624x337_c.jpg (Consulté le 17.03.2022)

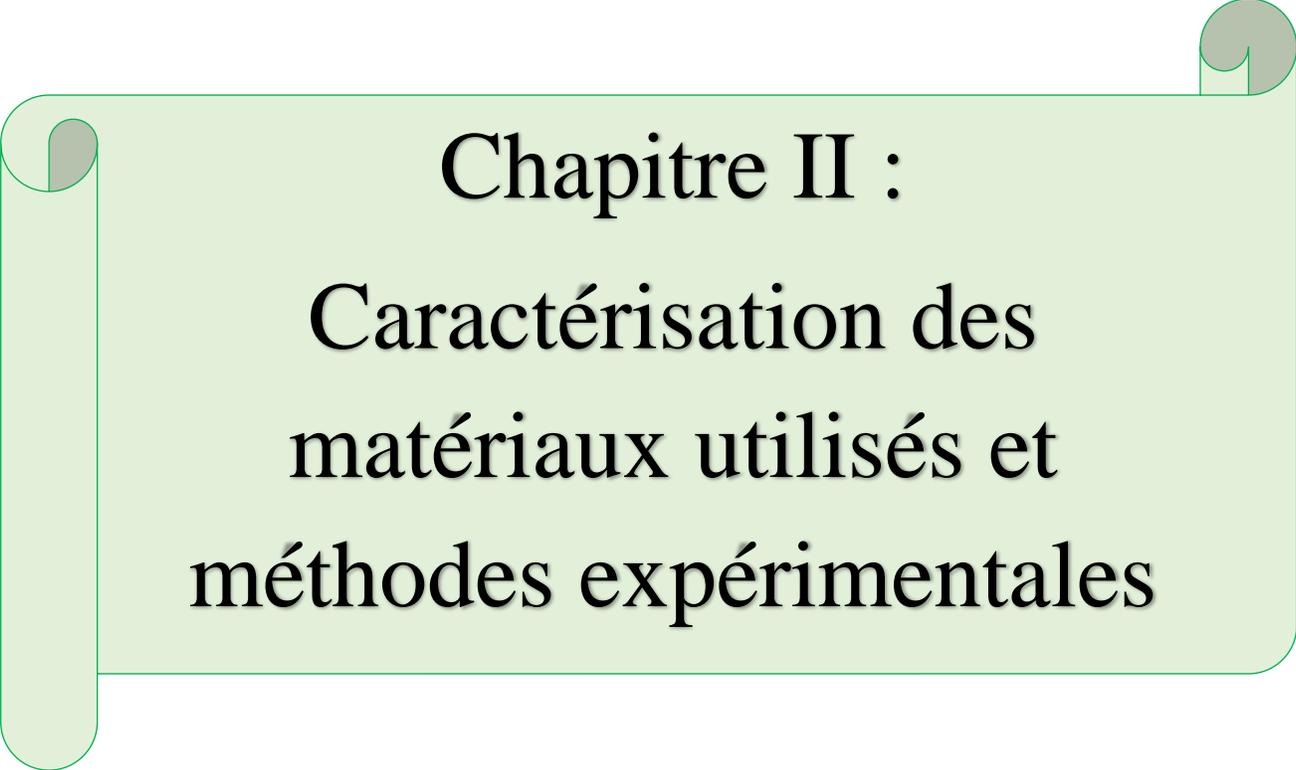
[17] <https://tonmag.net/astuces/6-trucs-a-faire-avec-les-coquilles-doeufs/30394/> (Consulté le 23.05.2022)

[18] **Ashfaque Ahmed Jhatial, Samiullah Sohu, Muhammad Jaffar Memon, Nadeem-ul-Karim Bhatti, Darya Memon.** : « *Eggshell powder as partial cement replacement and its effect on the workability and compressive strength of concrete* ». International Journal of Advanced and Applied Sciences. 6(9) P 71-75, 2019.

[19] **Yeong Yu Tan, Siew Choo Chin, Shu Ing Doh** : « *Eggshell as a partial cement replacement in concrete development* ». Magazine of Concrete Research. 70(13) P 662-670, 2017.

[20] **Amarnath Yerramala** : « *Properties of concrete with eggshell powder as cement replacement* ». Indian Concrete Journal. P 94-102, 2014.

[21] **Divya B., Vasanthavalli K., Ambalavanan R.** : « *Investigation on cement concrete at mixed with egg shell powder* ». International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology. Vol. 6, Issue 3, P 3946-3950, 2017.



Chapitre II :
Caractérisation des
matériaux utilisés et
méthodes expérimentales

Chapitre II :

CARACTERISATION DES MATERIAUX UTILISES ET METHODES EXPERIMENTALES

II.1. INTRODUCTION :

Cette partie présente l'étude expérimentale réalisée durant ce travail. Nous présentons tout d'abord les différents matériaux utilisés, ainsi que le plan expérimental afin d'étudier l'influence de l'utilisation de la poudre de la coquille d'œuf sur les propriétés rhéologiques, mécaniques ainsi la durabilité du mortier.

Les essais ont été effectués conjointement au laboratoire pédagogique du département de génie civil, et au Laboratoire de génie civil et d'hydraulique (LGCH) de l'Université 8 Mai 45 de Guelma.

Les protocoles pour la conduite des essais ont été conformes aux normes en vigueur.

II.2. MATERIAUX UTILISES :

Les différents matériaux utilisés sont :

- Un ciment de type CEM II/A-M (S-L) 42,5 N de la cimenterie de Hadjar Soud.
- Du sable roulé de la région de Tébessa.
- Les coquilles d'œufs collectées.
- L'eau du robinet.



Figure II.1. Matériaux utilisés.

II.3. CIMENT :

Pour la confection des mortiers d'étude, nous avons utilisé un ciment Portland composé CPJ-CEM II/A 42.5, provenant de la cimenterie de Hadjar Soud implantée dans la commune de Azzaba (Wilaya de Skikda).

Les différentes caractéristiques du ciment utilisé sont indiquées sur la fiche technique élaborée par le producteur au niveau d'un laboratoire spécialisé conformément à la norme NA 442-2008 [1], dont la composition chimique moyenne et les propriétés physiques sont présentées dans les tableaux suivants :

Tableau II.1. Composition chimique moyenne du ciment CPJ-CEM II utilisé [2].

Composants	CaO	SiO ₂	MgO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	Cl ⁻	SO ₃	P.A.F
(%)	58.6	24.92	1.21	6.58	3.65	0.08	0.00	2.17	1.70

Tableau II.2. Propriétés physiques du ciment utilisé [2].

Propriétés	Unité	Valeur
Masse volumique apparente	g/cm ³	1.09
Masse volumique absolue	g/cm ³	2.92
Surface spécifique de Blaine	cm ² /g	3550

II.4. LES COQUILLES D'ŒUFS

II.4.1. Préparation de la poudre de coquilles d'œufs :

Les coquilles d'œufs ont été recueillies, lavées avec de l'eau du robinet pour éliminer les impuretés puis séchées à l'étuve pendant 24 heures à une température de 105°. Ensuite, elles ont été transformées en poudre par broyage dans la machine Micro-Deval (figure II.2 -d-) pendant 6 heures et tamisées sur un tamis 63 μm (figure II.2 -e-).



(a) Coquilles d'œufs lavées.



(b) Séchage des coquilles à l'étuve.



(c) Masse moyenne d'une coquille d'œuf après séchage.



(d) Broyage des coquilles d'œufs dans le Micro-deval.



(e) Tamisage de la poudre de coquilles d'œufs sur un tamis de 63 μm .



(f) Poudre obtenue après tamisage.

Figure II.2. Préparation de la poudre des coquilles d'œufs.

II.4.2. Caractérisation de la poudre de coquilles d'œufs :

La granulométrie de la poudre des coquilles d'œufs a été caractérisée par granulométrie laser. L'essai a été réalisé au Laboratoire d'Analyse Industrielle et Génie des Matériaux – Université de Guelma, le résultat de l'essai est présenté dans la figure II.4.



Figure II.3. Appareil granulométrie laser utilisé.

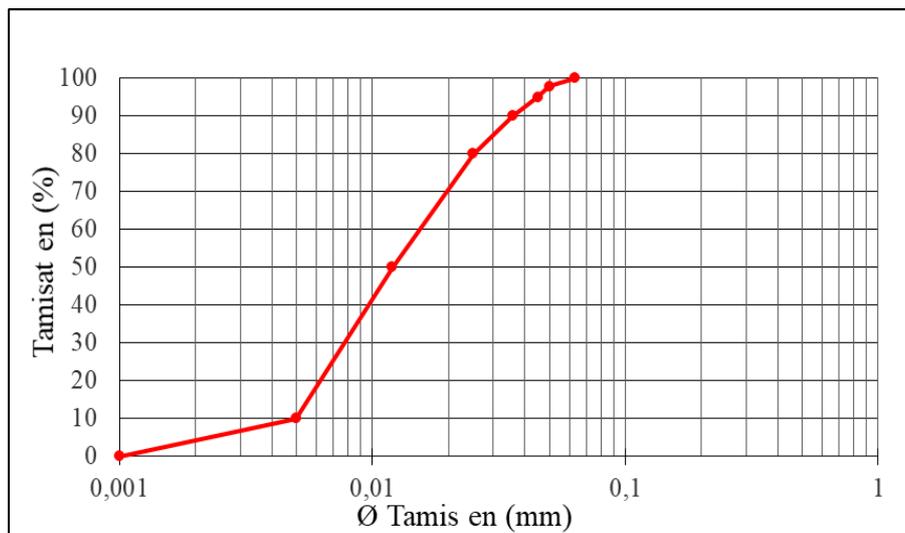


Figure II.4. Résultat de la granulométrie laser.

D'après la courbe granulométrique de la poudre des coquilles d'œufs, on remarque que notre poudre est à majorité d'éléments de taille inférieurs à 35 µm (le refus sur tamis 35 µm = 10% et le refus sur tamis 50 µm = 2.2%).

La composition chimique de poudre a été tirée de la littérature [3] et ses propriétés physiques (masse volumique absolue et la surface spécifique de Blaine) sont réalisées au laboratoire de la cimenterie de Hadjar Soud.

Les résultats sont présentés dans les tableaux II.3 et II.4

Tableau II.3. Composition chimique de la poudre de coquilles d'œufs [3].

Composants	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO ₃	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	PAF
(%)	50.9	0.13	0.03	0.8	0.02	0.76	0.11	47.25

La composition chimique présentée dans le tableau II.3 indique également que cette poudre est constituée majoritairement de CaCO₃ [3].

Tableau II.4. Propriétés physiques de la poudre de coquilles d'œufs.

Propriétés	Unité	Valeur
Masse volumique apparente	g/cm ³	0.749
Masse volumique absolue	g/cm ³	2.8
Surface spécifique de Blaine	cm ² /g	7243



Figure II.5. Essai masse volumique absolue.



Figure II.6. Appareil de Blaine automatique.

II.5. SABLE :

II.5.1. Analyse granulométrique (Norme EN 933-1) [4] :

✚ Principe d'essai :

L'essai consiste à classer les différents grains constituant l'échantillon en utilisant une série de tamis, emboîtés les uns sur les autres, dont les dimensions des ouvertures sont décroissantes du haut vers le bas. Le matériau étudié est placé en partie supérieure des tamis et les classements des grains s'obtiennent par vibration de la colonne des tamis pendant cinq (05) minutes puis on prélève les différents refus de chaque tamis et on les pèse.



Figure II.7. Tamiseuse électrique.

Tableau II.5. Résultats de l'analyse granulométrique du sable.

Tamis (mm)	Refus partiel (g)	Refus cumulé (g)	Refus cumulé (%)	Tamisât cumulé (%)
4	0.3	0.3	0.01	99.99
3.55	1.4	1.7	0.11	99.89
2	28.8	30.5	2.03	97.97
1	127.2	157.7	10.51	89.49
0.5	578.1	735.8	49.04	50.96
0.25	577	1312.8	87.50	12.5
0.125	147.6	1460.4	97.34	2.66
0.063	28.3	1488.7	99.23	0.77
Fond	11.1	1499.8	99.97	0.03

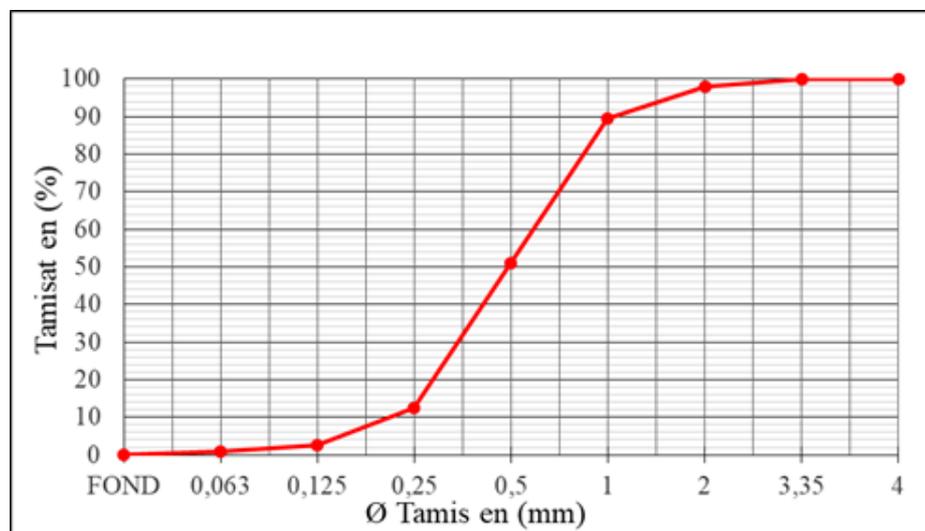


Figure II.8. Courbe granulométrique du sable utilisé.

🔧 Module de finesse (norme EN 12620+A1) [5] :

Le module de finesse est le 1/100 de la somme des refus cumulés exprimés en pourcentage, sur les différents tamis de la série : 0.125 – 0.250 – 0.50 – 1.00 – 2.0 – 4.

Dans notre cas :

$$Mf = \frac{97.34 + 87.50 + 49.04 + 10.51 + 2.03 + 0.01}{100} = 2.46$$

$Mf = 2.46$: d'après la norme on est donc en présence d'un sable préférentiel.

II.5.2. Masse volumique : (Norme EN 1097-6) [6].

La masse volumique d'un corps est la masse de l'unité de volume de ce corps. On distingue deux types de masse volumique : absolue et apparente.

✚ Masse volumique absolue :

Procédure :

- Mettre dans une éprouvette graduée un volume V_1 d'eau,
- Peser une masse M de l'échantillon à étudier, et l'introduire dans l'éprouvette,
- Bien éliminer les bulles d'air,
- Lire le nouveau volume V_2

Le volume absolu est donc : $V = V_2 - V_1$

Et la masse volumique absolue :

$$\rho_{absolue} = \frac{M}{V_2 - V_1}$$



Figure II.9. Masse volumique absolue.

✚ Masse volumique apparente :

Procédure :

- Verser le sable dans un récipient de volume connu en utilisant un entonnoir jusqu'à ce qu'il déborde tout autour,
- Araser à l'aide d'une règle métallique,
- Peser le contenu, noter la masse M.

La masse volumique apparente est : $\rho_{apparente} = \frac{M}{V}$

Tableau II.6. Valeurs des masses volumiques.

	Sable
Masse volumique absolue (g/cm³)	2.58
Masse volumique apparente (g/cm³)	1.51

II.5.3. Equivalent de sable (Norme EN 933-8) [7] :

L'équivalent de sable indique la teneur en éléments fins, d'origine essentiellement argileuse, végétale ou organique à la surface des grains.

L'essai consiste à :

- Remplir une éprouvette graduée jusqu'au 1^{er} trait,
- Verser la quantité de sable et laisser reposer pendant 10 minutes,
- Boucher l'éprouvette et la faire agiter 90 fois aller et retour dans le sens horizontal puis replacer verticalement,
- Laver et remplir l'éprouvette jusqu'au 2^e repère,
- Laisser reposer l'ensemble pendant 20 minutes,
- Mesurer la hauteur du sable propre (h'_2) et la hauteur du sable propre + éléments fins (h_1).
- La mesure de h'_2 n'est pas toujours aisée, ce qui conduit à faire la mesure la plus précise : ES.
- Descendre lentement le piston dans l'éprouvette jusqu'à ce qu'il repose sur le sédiment,
- L'immobiliser, mesurer h_2 .

L'équivalent de sable visuel (ESV) est défini par :

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

L'équivalent de sable est défini par :

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

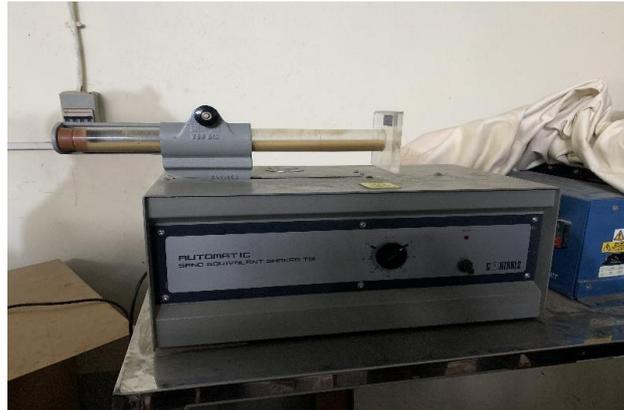


Figure II.10. Equivalent de sable.

Tableau II.7. Qualité du sable en fonction des valeurs d'équivalent de sable ESV et ES.

Esv	Es	Nature et qualité du sable
< 65	< 60	Sable argileux
65 ≤ Es ≤ 75	60 ≤ Es ≤ 70	Sable largement argileux
75 ≤ Es ≤ 85	70 ≤ Es ≤ 80	Sable propre à faible de fines
Es ≥ 85	Es ≥ 80	Sable très propre

Tableau II.8. Résultats de l'équivalent de sable.

Equivalent de sable visuel (ESV)	86.98
Equivalent de sable (ES)	84.76

D'après les résultats obtenus et d'après le tableau II.7, on déduit que nous avons un sable très propre.

II.6. EAU :

L'eau utilisée pour l'ensemble des essais est celle du robinet disponible au réservoir de laboratoire de génie civil et hydraulique de l'université 8 Mai 1945 Guelma.

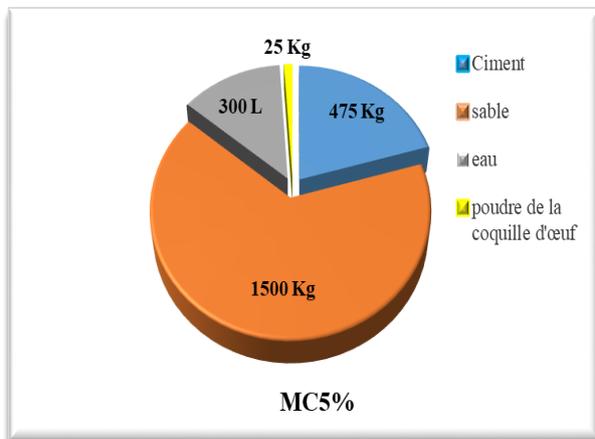
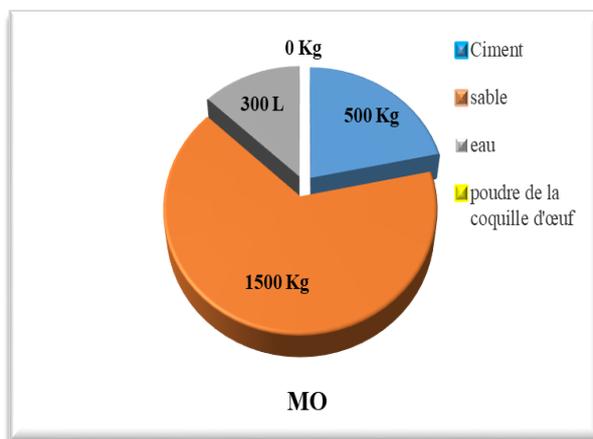
II.7. FORMULATION DES DIFFERENTS MORTIERS POUR NOTRE ETUDE :

Les essais sont effectués sur un mortier ayant une composition standard de ciment, sable et eau tel que le rapport pondéral ciment : sable : eau est égal à 1:3:0.60. A partir de ce mortier de base, on a substitué une partie de ciment par des proportions variables de 0, 5, 10 et 15% de la poudre de coquille d'œuf.

Les différents mortiers sont confectionnés avec un rapport $E/(C+A)$ constant de 0.6. Le tableau II.9 donne les compositions des différents mortiers :

Tableau II.9. Compositions des différents mortiers.

	Formulation pour 1 m ³			
	MO	MC5 %	MC10 %	MC15 %
Sable (kg)	1500	1500	1500	1500
Ciment (kg)	500	475	450	425
Poudre de coquille d'œufs (PC) (kg)	--	25	50	75
Eau (L)	300	300	300	300
E/(C + A)	0.6	0.6	0.6	0.6



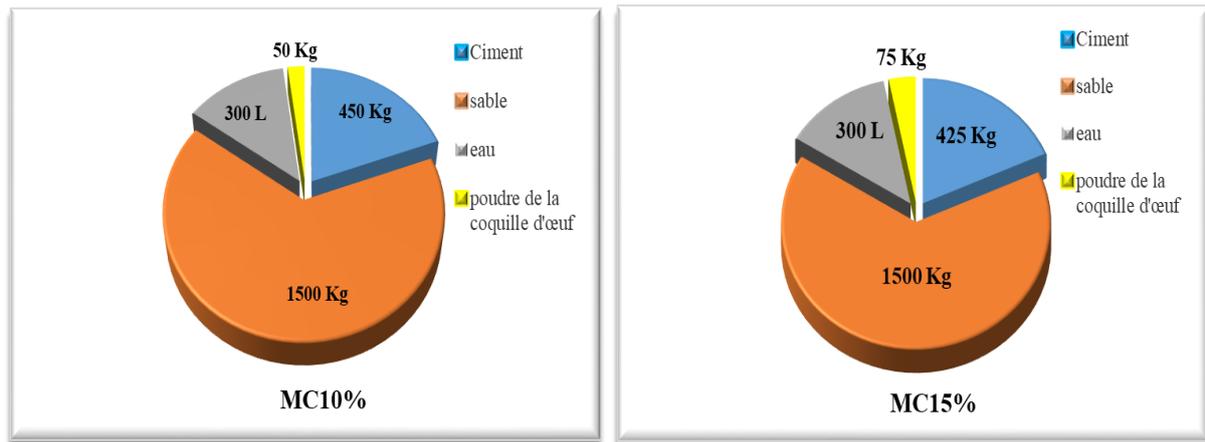


Figure II.11. Diagrammes à secteurs de la formulation des mortiers d'étude.

II.7.1. Confections des éprouvettes :

Pour les besoins de notre étude et selon la nature des essais à réaliser, on a utilisé des moules prismatiques ($4 \times 4 \times 16$) cm^3 , et des moules Cubiques ($15 \times 15 \times 15$) cm^3 pour la confection des éprouvettes.

Le malaxage des mortiers a été effectué à l'aide d'un malaxeur à axe vertical d'une capacité de 3 L. La palette du malaxeur pouvant tourner à deux vitesses (lente et rapide). La séquence de malaxage est conforme à la norme (EN 196-1) [8].

- Verser l'eau dans le récipient et introduire le liant et mettre le malaxeur en marche à vitesse lente pendant 30 s
- Après 30 s, introduire régulièrement le sable (pendant les 30 s suivantes) et mettre le malaxeur à sa vitesse rapide et continuer à mélanger pendant 30 s supplémentaires ;
- Arrêter le malaxeur pendant 1 min 30 s. Pendant les 15 premières secondes, enlever au moyen d'une raclette tout le mortier adhérent aux parois et au fond du récipient en le repoussant vers le milieu de celui-ci ;
- Reprendre ensuite le malaxage à vitesse rapide pendant 60 s.



Figure II.12. Malaxeur à mortier.

Après malaxage, on introduit le mortier dans les moules en deux couches et pour chaque couche, on fait vibrer le moule sur une plaque vibrante pendant une (01) minute, pour éliminer les bulles d'air.

Les moules sont au préalable nettoyées et huilées pour un démoulage plus facile.



Figure II.13. Moules graissées avec de l'huile.



Figure II.14. Remplissage des moules.

Les éprouvettes ont été démoulées après 24 heures et conservées dans l'eau jusqu'à la période des différents essais réalisés.



Figure II.15. Conservation des éprouvettes dans l'eau.

II.8. ESSAIS EXPERIMENTAUX REALISES SUR MORTIERS PREPARES :

Différents essais ont été effectués afin de déterminer les propriétés des mortiers d'étude MO, MC5%, MC10% et MC15%.

II.8.1. Essai sur mortier frais :

II.8.1.1. Ouvrabilité : essai d'étalement à la table à secousses (Norme NF EN 1015-3)[9] :

Cet essai d'étalement est une mesure testant l'aptitude du mortier à s'étaler par écoulement. L'essai d'étalement permet de déterminer l'étalement des échantillons de mortiers destiné à la confection des éprouvettes. L'essai est réalisé sur une table mobile comportant un plateau plan relié à une base rigide et un moule en forme de tronc de cône posé au centre du plateau.

Le moule est rempli par une quantité de mortier par deux (02) couches successives, chaque couche est compactée à l'aide d'une tige. Une fois le moule rempli, on le retire lentement puis on applique, en tournant la manivelle, 15 secousses à la table. Chaque secousse est espacée d'une (01) seconde.

On a ensuite mesuré deux diamètres D_1 et D_2 puis fait la moyenne des deux pour obtenir la valeur d'étalement.

Tableau II.10. Valeurs d'étalement.

Consistance d'utilisation	Valeurs d'étalement
Mortier raide	< 14 cm
Mortier plastique	Entre 14 cm et 20 cm
Mortier fluide	> 20 cm



Figure II.16. Table à secousses.

II.8.1.2. Essai de prise :

Le temps de prise est déterminé à l'aide de l'appareil de Vicat (Figure II.15) muni d'une aiguille selon la norme NF EN 196-3 [10] à la température de $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$.

Pour mesurer le temps de prise, il faut :

- Régler l'appareil de Vicat muni de l'aiguille par abaissement de celle-ci jusqu'à la plaque de base plane et ajuster le repère au zéro de l'échelle.
- Relever l'aiguille en position d'attente.
- Introduire le mortier dans le moule tronconique sans tassement excessif, le moule étant placé sur la plaque de base plane dans l'appareil de Vicat.
- Lâcher l'aiguille sur le mortier et noter ce moment comme temps zéro, et noter la distance « d » entre l'extrémité de l'aiguille et la plaque de base plane
- Renouveler la mesure de « d » toutes les 10 minutes
- Le temps de début de prise correspond à la lecture de 4 ± 1 mm du fond du moule, noté à partir du temps 0.
- Pour déterminer le temps de fin de prise, retourner le moule tronconique rempli du mortier sur la plaque de base plane
- Placer le moule inversé et la plaque de base plane dans l'axe de la sonde de l'appareil de Vicat
- Le temps de fin de prise correspond à la lecture de $2,5 \pm 1$ mm de la surface du moule, noté à partir du temps 0.



(a) Appareil de Vicat

(b) Thermomètre utilisé.

Figure II.17. Essai de prise.

II.8.1.3. Teneur en air occlus :

La teneur en air se mesure à l'aide d'un aéromètre. La méthode se base sur la compressibilité de l'air contenu dans le mortier frais. Un volume déterminé de mortier est mis en communication avec un volume d'air en surpression [11].

La valeur de la pression résultante permet de déterminer la teneur en air du mortier.

*Figure II.18. Teneur en air occlus.*

II.8.1.4. Masse volumique à l'état frais (Norme NF EN 1015-6) [12] :

Pour déterminer la masse volumique à l'état frais, un récipient d'un litre de volume a été utilisé.

- On pèse le récipient sur une balance, puis on fait la tare.
- On remplit le récipient avec le mortier en deux couches, chaque couche est piquée 25 fois à l'aide d'une tige. On arase le haut du récipient.
- On pèse ensuite le récipient rempli de mortier.

La masse volumique du mortier à l'état frais est donnée par la relation : $\rho_f = \frac{M}{V}$



Figure II.19. Masse volumique à l'état frais.

II.8.2. Etude des performances des différents mortiers a l'état durci :

II.8.2.1. Masse volumique à sec (méthode de pesée hydrostatique) [11] :

La détermination de la masse volumique à sec a été effectuée avec les éprouvettes prismatiques (4x4x16) cm^3 . Les éprouvettes ont été conservées dans l'eau pendant 28 jours puis sorties de l'eau et mises à l'étuve pour séchage jusqu'à obtention d'une masse constante.

Elles ont ensuite été pesées à l'air puis dans l'eau.

La masse volumique à sec est donnée par la formule :

$$\rho_s = \frac{M_{air}}{M_{air} - M_{imm}}$$

ρ_s : Masse volumique à sec ;

M_{air} : Masse de l'éprouvette dans l'air ;

M_{imm} : Masse de l'éprouvette dans l'eau.



Figure II.20. Pesée hydrostatique.

II.8.2.2. Essai d'absorption par immersion totale :

L'absorption d'eau est utilisée comme un indicateur de la qualité du béton. Elle est déterminée par immersion d'une éprouvette dans l'eau jusqu'à masse constante et en mesurant l'augmentation de masse. Elle est exprimée en pourcentage de la masse sèche de l'éprouvette [11].

Les éprouvettes (4x4x16) cm^3 après conservation dans l'eau, ont été sorties puis pesées et mises à l'étuve pour séchage jusqu'à obtention d'une masse constante.

Chaque éprouvette a été essuyée avec une serviette humide avant d'être pesée.

L'absorption par immersion totale est calculée par la relation suivante :

$$Abs = \frac{M_{imm} - M_{sec}}{M_{sec}} \times 100$$

M_{imm} : Masse de l'éprouvette après immersion,

M_{sec} : Masse de l'éprouvette après séchage à l'étuve.

II.8.2.3. Essai de compression :

La résistance à la compression est la capacité d'un matériau ou d'une structure à supporter les charges qui tendent à réduire sa taille par compression (écrasement). L'essai de compression consiste à soumettre les éprouvettes à deux forces axiales opposées entre deux plateaux d'une presse à une vitesse de $0,5 \text{ MPa/s}$ [13].

L'essai a été réalisé sur les moitiés des éprouvettes prismatiques obtenues après l'essai de traction par flexion.



Figure II.21. Appareil d'essai de compression.

II.8.2.4. Essai de traction par flexion : Norme NF EN 1015-11 [14].

L'essai de flexion permet de mesurer la résistance à la rupture d'un matériau. Cet essai est réalisé sur les éprouvettes de mortier qui sont posés entre trois points d'appuis, on applique, à une vitesse constante de 50 N/s , un effort sur le point central avec une force croissante jusqu'à rupture.

L'essai a été réalisé sur des éprouvettes prismatiques $(4 \times 4 \times 16) \text{ cm}^3$ conservées dans l'eau, elles ont été sorties 24 heures avant l'essai.

Les essais ont été effectués sur les mortiers à l'âge de 7 et 28 jours.

La résistance à la traction par flexion est calculée à partir de la formule :

$$R_f = \frac{1,5 * F * L}{B^3}$$

R_f : La résistance à la traction par flexion en (MPa)

F : La charge appliquée à la rupture en (N)

L : La distance entre les appuis (L = 12 cm)

B : Le coté de la section carrée de l'éprouvette (B = 4 cm).



Figure II.22. Appareil pour essai de traction par flexion.

II.8.2.5. Essai d'auscultation sonore (ultra-son) :

L'essai de la vitesse de propagation d'ultra-son permet de mesurer le temps de propagation d'un train d'ondes sonores entre l'émetteur et le récepteur de l'appareil disposés sur deux points de l'éprouvette cubique du béton. Ce temps de propagation permet de calculer la vitesse de propagation à l'intérieur du matériau [15].

L'essai a été réalisé avec des éprouvettes cubiques (15x15x15) cm^3 . On a utilisé un gel de contact pour un contact parfait entre l'émetteur et le récepteur et les éprouvettes.

La vitesse de propagation du son à travers le béton est déterminée par la formule suivante :

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

V : la vitesse de propagation du son, en (m/s) ;

L : la longueur de parcours, en mm ;

T : le temps que met l'impulsion pour parcourir la longueur, en (μ s).

Tableau II.11. Corrélation entre la vitesse du son et la qualité du matériau.

Vitesse du son (m/s)	Appréciation de la qualité
Supérieur à 4500	Excellent
3500 à 4500	Bon
3000 à 3500	Assez bon
2000 à 3000	Médiocre
Inférieur à 2000	Très mauvais



Figure II.23. Appareil d'auscultation sonore.

II.8.2.6. Essai de porosité accessible à l'eau :

La porosité est un paramètre de premier ordre qui caractérise les propriétés mécaniques ainsi que la durabilité d'un matériau. Elle représente la part de vide contenu dans le matériau à l'état durci à l'âge de 28 jours. C'est la méthode de caractérisation la plus simple et la plus utilisée [15].

Après conservation des éprouvettes ($4 \times 4 \times 16$) cm^3 dans l'eau pendant 28 jours, elles ont été pesées à l'air puis dans l'eau sur une balance hydrostatique, et mises à l'étuve.

La porosité accessible à l'eau est déterminée par la formule :

$$P = \frac{M_{air} - M_{sec}}{M_{air} - M_{eau}} \times 100$$

Avec :

M_{air} : Masse de l'éprouvette saturée à l'air,

M_{eau} : Masse de l'éprouvette immergée dans l'eau,

M_{sec} : Masse de l'éprouvette après séchage à l'étuve.

II.8.2.7. Absorption d'eau par capillarité :

L'essai d'absorption d'eau capillaire caractérise le coefficient qui traduit le mouvement de l'eau dans les matériaux poreux à travers les pores ou capillaires. Le transfert d'agents agressifs à travers ces capillaires peut affecter les performances de ces matériaux [11].

L'essai a été réalisé avec des éprouvettes prismatiques (4x4x16) cm^3 conservées dans l'eau pendant 28 jours. Après les 28 jours les éprouvettes ont été sorties de l'eau puis conservées à l'étuve jusqu'à obtention d'une masse constante.

Les faces latérales des éprouvettes sont imperméabilisées par matériaux étanche qui forcent l'eau à adopter un cheminement uni-axial et éviter l'évaporation par ces mêmes faces. Les éprouvettes sont ensuite immergées dans une nappe d'eau de hauteur 5mm pendant 48 h.

L'essai d'absorption capillaire consiste à déterminer la quantité d'eau absorbée par le mortier en fonction du temps (1min, 4min, 9min, 16min, 25min, 36min, 49min, 64min, 2h, 4h, 8h, 24h, 48h). À chaque échéance, les éprouvettes sont sorties du récipient, essuyées à l'aide d'une éponge humide, pesées puis replacées dans le récipient [11].

L'absorption capillaire (CA) est calculée par la formule suivante :

$$CA = \frac{M_j - M_0}{S^2}$$

M_j : Masse de l'éprouvette après le temps requis d'absorption,

M_0 : Masse sèche de l'éprouvette avant immersion dans l'eau,

S : Section de la base de l'éprouvette.

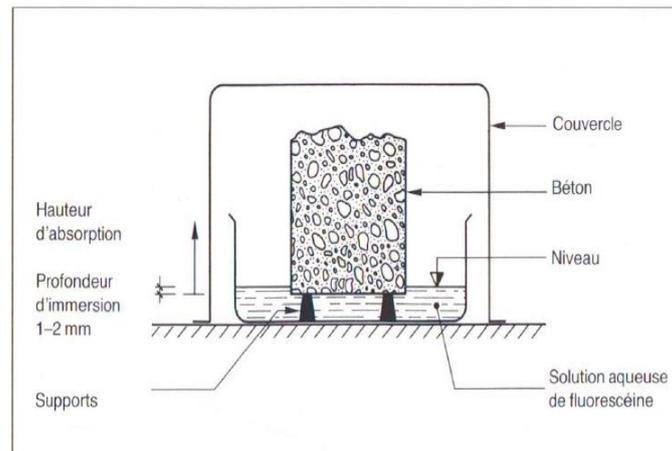


Figure II.24. Dispositif de l'essai de capillarité [1].

II.8.2.8. Perméabilité à l'eau (profondeur de pénétration d'eau sous pression) : Norme NF P18-436 [16].

De l'eau est appliquée sous pression sur la surface du béton durci. Placer l'éprouvette dans le dispositif d'essai et appliquer une pression d'eau de 500 ± 50 kPa pendant 72 heures. Après rupture de l'éprouvette par fendage, on mesure la profondeur de pénétration de l'eau.

L'essai doit être pratiqué sur des éprouvettes âgées de 28 jours au moins. Ne pas appliquer la pression d'eau sur la surface d'une éprouvette arasée à la truelle.

L'éprouvette doit être cubique, cylindrique ou prismatique. Son arête ou son diamètre ne doit pas être inférieur à 150 mm.

Le dispositif d'essai doit permettre de placer l'éprouvette, de dimensions données, de telle façon que la pression d'eau peut s'exercer sur la zone d'essai. Il doit comporter un joint en caoutchouc ou en matériau similaire. Il doit offrir une zone d'essai mesurant environ la moitié de la longueur de l'arête ou du diamètre de la surface d'essai.

Pour cet essai on a utilisé des éprouvettes cubiques $(15 \times 15 \times 15)$ cm³.



Figure II.25. Perméabilimètre à l'eau.

II.8.2.9. Essai d'attaque acide :

Après une cure dans l'eau de 28 jours (temps zéro), les éprouvettes de mortier de $(4 \times 4 \times 16)$ cm^3 ont été pesées pour déterminer la masse initiale M_1 avant d'être soumises à l'immersion durant 14, 28 et 56 jours dans une solution d'acide sulfurique H_2SO_4 concentrée à 5% et de $pH = 1$.

Au sortir de la solution, les éprouvettes sont nettoyées avec de l'eau afin d'éliminer le mortier altéré, puis pesées pour déterminer la masse M_2 .

Dans notre cas, la solution a été renouvelée chaque 14 jours. Et le degré d'attaque est évalué par l'expression suivante :

$$\text{Perte en masse (\%)} = \frac{M_2 - M_1}{M_1} \times 100 \%$$

M_1 : Masse avant immersion dans la solution acide, en gramme (g) ;

M_2 : Masse à l'âge i , en gramme (g).

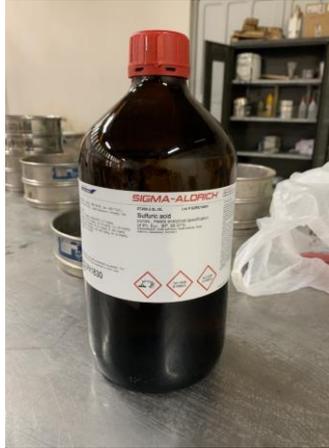


Figure II.26. Acide sulfurique utilisé.



Figure II.27. Conservation des éprouvettes dans la solution d'acide sulfurique.

II.9. CONCLUSION :

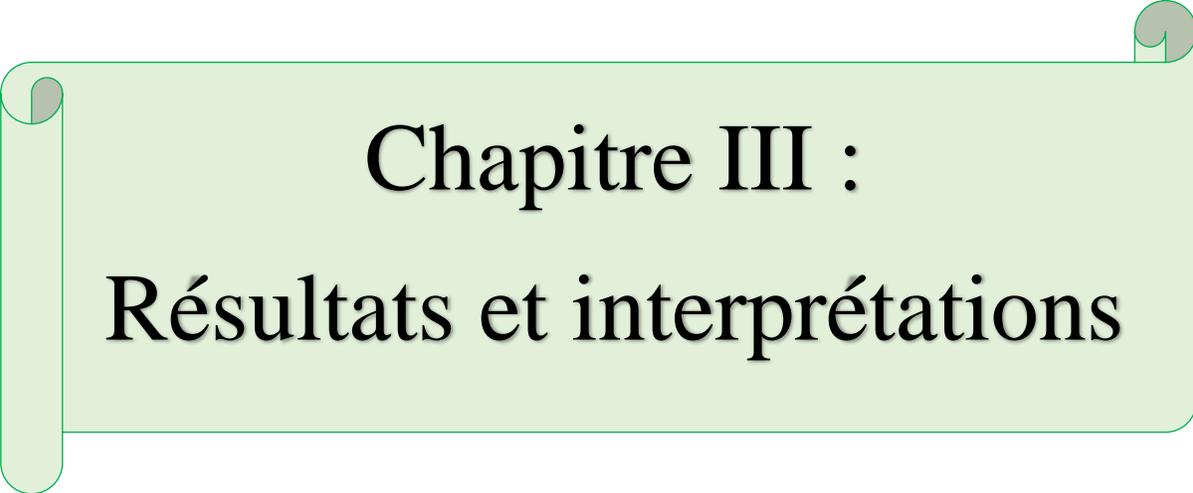
Dans cette partie, nous avons exposé les différents matériaux utilisés dans nos formulations ainsi que leurs propriétés chimiques et physiques.

Des essais de caractérisations à l'état frais et à l'état durci ont été réalisés sur les différentes formulations de mortier.

Les résultats expérimentaux issus de ce programme d'essais sont présentés dans le chapitre suivant.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES :

- [1] **Norme NA 442** : Ciment - Composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants.
- [2] **Fiche technique** ciment Portland composé CPJ-CEM II/A 42.5 de la cimenterie de Hadjar Soud.
- [3] **AMARA Hanane, ARABI Nouredine** : *Valorisation des coquilles d'œufs en tant qu'addition minérale dans la formulation de béton auto plaçant de granulats recyclés*. Séminaire International de Génie Civil sur les Matériaux cimentaires, « SIGC2018" Oran les 27 & 28 Novembre 2018.
- [4] **Norme EN 933-1** : Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats - Partie 1 : détermination de la granularité - Analyse granulométrique par tamisage. Mai 2021.
- [5] **Norme EN 12620+A1** : Granulats pour bétons. Juin 2008.
- [6] **Norme EN 1097-6** : Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats - Détermination de la masse volumique réelle et du coefficient d'absorption d'eau. 2001.
- [7] **Norme EN 933-8** : Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats – Evaluation des fines - Equivalent de sable. 1999.
- [8] **Norme EN 196-1** : Méthodes d'essais des ciments - Partie 1 : détermination des résistances. Septembre 2016
- [9] **Norme NF EN 1015-3** : Méthodes d'essai des mortiers pour maçonnerie - Partie 3 : Détermination de la consistance du mortier frais (avec une table à secousses). 1999.
- [10] **Norme NF EN 196-3** : Méthodes d'essais des ciments – Partie 3 : Détermination du temps de prise et de la stabilité. Septembre 2017.
- [11] **BOUCHELAGHEM Khawla** : *Caractérisation des matériaux cimentaires à base de granulats de caoutchouc*. Mémoire de master Génie Civil, Structures, Université 8 Mai 1945 - Guelma-, 2021.
- [12] **Norme NF EN 1015-6 /A1** : Méthodes d'essai des mortiers pour maçonnerie - Partie 6 : détermination de la masse volumique apparente du mortier frais.
- [13] **TALEB, Karina** : *Etude à l'état frais et à l'état durci de l'influence des fines de mortiers de démolition sur les propriétés des mortiers*. Mémoire de master Génie Civil, Structure et Matériaux. Université Mouloud Mammeri - Tizi Ouzou-, 2016.
- [14] **Norme NF EN 1015-11** : Méthodes d'essai des mortiers pour maçonnerie - Partie 11 : détermination de la résistance en flexion et en compression du mortier durci. 2000.
- [15] **DERABLA Riad** : *Influence des additions minérales sur le comportement au jeune âge et à long terme des bétons auto plaçants traités thermiquement*. Thèse de doctorat : Université 8 Mai 1945 Guelma, 2015.
- [16] **Norme NF P18-436** : Essai pour béton durci, Partie 8 : Profondeur de pénétration d'eau sous pression, 20 octobre 2001.



Chapitre III :

Résultats et interprétations

Chapitre III :

RESULTATS ET INTERPRETATIONS

III.1. INTRODUCTION :

Dans ce chapitre, nous présentons les différents résultats expérimentaux obtenus à partir des essais réalisés sur les mortiers d'étude à l'état frais et à l'état durci. A l'issue de ces résultats, des discussions seront présentées au fur et à mesure.

III.2. RESULTATS ET INTERPRETATIONS :

III.2.1. Essais sur mortiers à l'état frais :

III.2.1.1. Ouvrabilité : Essai d'étalement à la table à secousses :

Les valeurs de l'étalement en fonction du taux de substitution du ciment par la poudre de coquilles d'œufs dans les mortiers d'étude sont présentées dans le tableau III.1 et la figure III.2.

Tableau III.1. Valeurs d'étalement.

	MO	MC5%	MC10%	MC15%
Etalement (cm)	16.9	12.5	17.6	18.5



Figure III.1. Essai d'étalement pour le mortier MC5%.

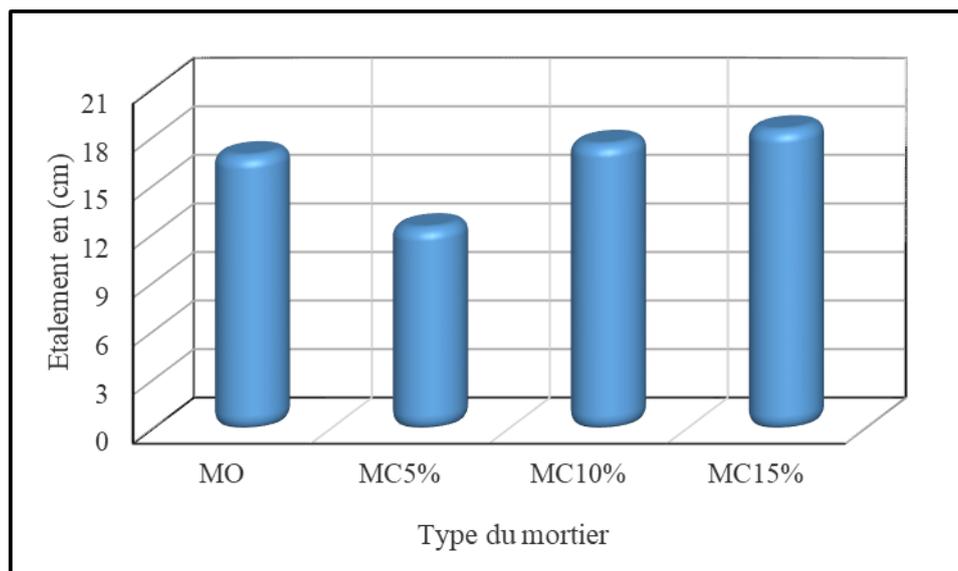


Figure III.2. Valeurs d'étalement des 04 mortiers étudiés.

D'après les résultats, on remarque que la substitution du ciment par des taux de 10% et 15% de la poudre des coquilles d'œufs fait augmenter l'étalement du mortier. Il passe de 16.9 cm pour le MO à 17.6 cm et 18.5 cm pour les mortiers MC10% et MC15% successivement. Malgré l'augmentation, on remarque que les étalements des mortiers MC10% et MC15% sont entre 14 cm et 20 cm, donc d'après la norme **NF EN 1015-3** sont des mortiers plastiques. Pour le MC5%, on remarque une diminution de l'étalement à 12.5 cm donc d'après la norme c'est un mortier raide.

Par rapport au mortier témoin, on remarque une baisse de l'étalement de 26.3% pour le MC5% contre une augmentation de 4.1% et 9.5% pour les mortiers MC10% et MC15% respectivement.

III.2.1.2. Essai de prise :

Les résultats de l'essai de début et fin de prise sur mortier sont présentés dans le tableau III.2 et la figure III.3

Tableau III.2. Valeurs d'essai début et fin de prise.

	MO	MC5%	MC10%	MC15%
Début de prise (h)	2h30	3h	4h30	4h15
Fin de prise (h)	3h45	4h	5h30	5h30

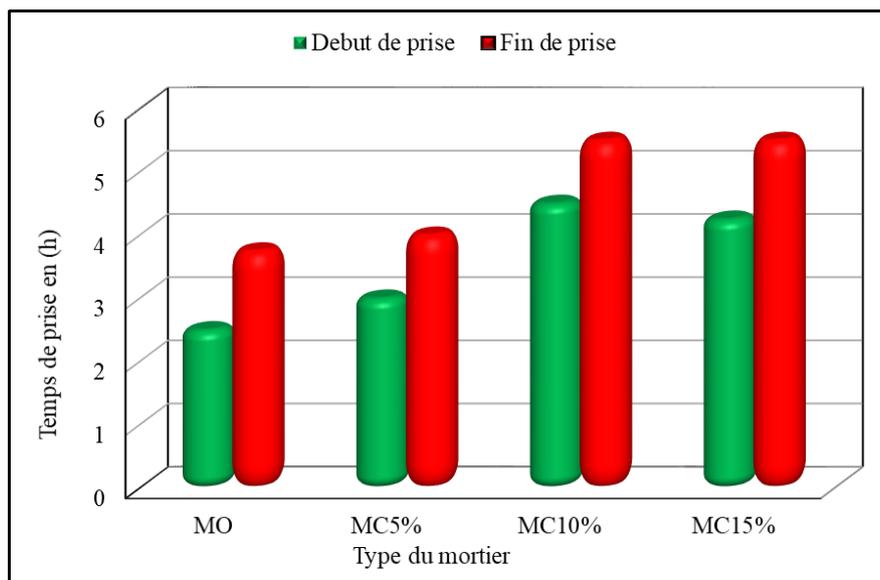


Figure III.3. Valeurs du temps de début et fin de prise.

D'après la figure III.3, on remarque que le temps de début et fin de prise augmente avec l'augmentation du taux de substitution du ciment par la poudre des coquilles d'œufs. A titre d'exemple, le temps de début de prise passe de 2h30 pour le MO à 3h pour le MC5% et 4h30 pour le MC10%.

III.2.1.3. Teneur en air occlus :

Le tableau III.3 et la Figure III.4 présentent l'évolution de la teneur en air en fonction du taux de substitution du ciment par la poudre des coquilles d'œufs pour les 04 formulations du mortier d'étude.

Tableau III.3. Valeurs de l'air occlus.

	MO	MC5%	MC10%	MC15%
Air occlus (%)	6.5	5.2	6.1	6.5

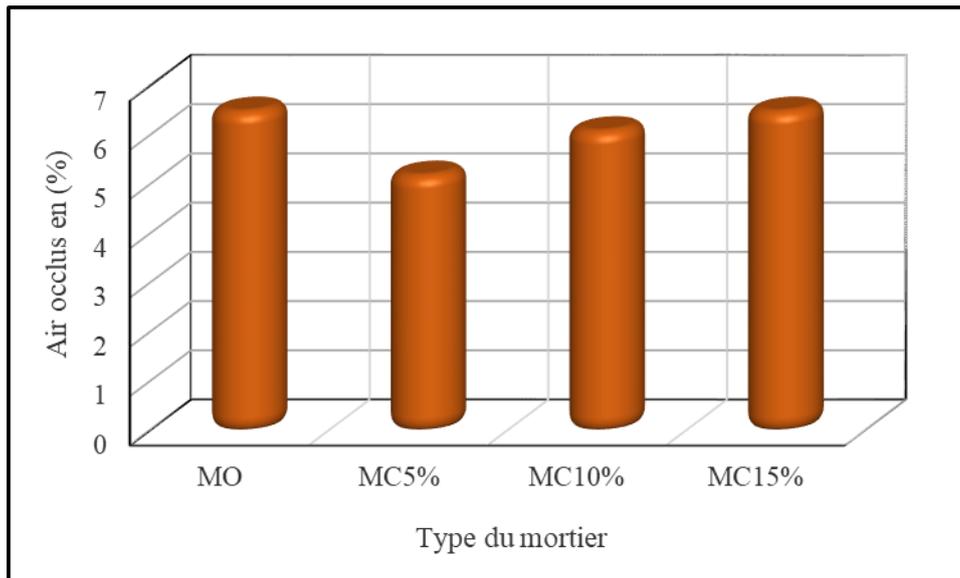


Figure III. 4. Valeurs de l'air occlus.

D'après les résultats présentés dans la figure III.4, on peut constater que la substitution de 5% du ciment par la poudre de coquilles d'œufs fait diminuer l'air occlus de 6.5% à 5.2%, donc une diminution de 20%. Pour les deux autres taux de substitution (10% et 15%) on remarque que les écarts (exprimés en %) sont faibles (0 et 6% pour le MC10% et 0% pour le MC15%). Donc, au-delà de 5%, l'effet de la substitution sur la compacité du mélange est presque insignifiant.

III.2.1.4. Masse volumique à l'état frais :

Dans le tableau III.4 et la figure III.5 nous avons rassemblé les résultats des mesures de la masse volumique à l'état frais pour les quatre formulations du mortier d'étude.

Tableau III.4. Valeurs de la masse volumique.

	MO	MC5%	MC10%	MC15%
Masse volumique (kg/m³)	2202.5	2095.9	2071.8	2050.9

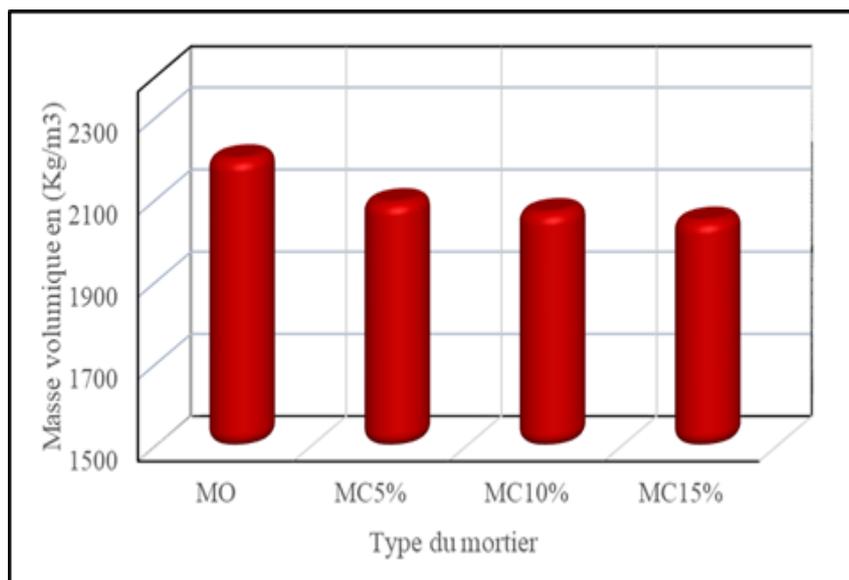


Figure III.5. Valeurs de la masse volumique.

D'après la figure III.5, la masse volumique à l'état frais des mortiers diminue avec l'augmentation du taux de substitution du ciment par la poudre de coquilles d'œufs. Avec des taux de substitution entre 5% et 15% de la poudre, on obtient des diminutions variées entre 4,8 et 6,9%.

III.2.2. Essais sur mortiers à l'état durci :

III.2.2.1. Masse volumique à sec (méthode de pesée hydrostatique) :

Dans le tableau III.5 et la figure III.6 nous avons rassemblé les résultats des mesures de la masse volumique à sec en fonction du taux de substitution du ciment par la poudre de coquilles d'œuf pour les différentes compositions.

Tableau III.5. Valeurs de la masse volumique à sec.

	MO	MC5%	MC10%	MC15%
Masse volumique (kg/m^3)	1961.1	1871.6	1843.8	1777.2

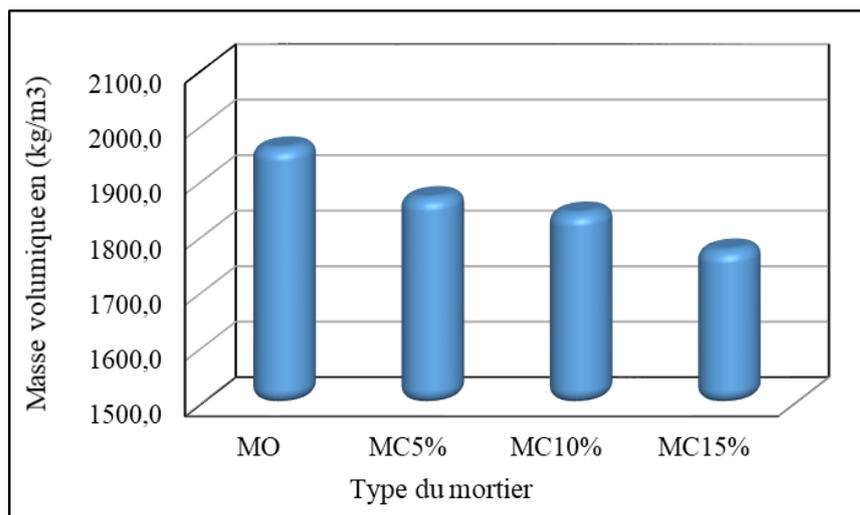


Figure III.6. Valeurs de la masse volumique à l'état durci.

Comme dans le cas de la masse volumique à l'état frais, la substitution d'une partie du ciment par la poudre de coquilles d'œufs s'accompagne d'une baisse de la masse volumique du mortier durci. Cette baisse croît avec le taux de substitution.

Par rapport au mortier témoin MO, on remarque une baisse de la masse volumique de 4.6% pour le MC5% contre une baisse de 9.4% pour le béton MC15%.

III.2.2.2. Essai d'absorption par immersion totale :

Dans le tableau III.6 et la figure III.7 nous avons regroupé les résultats des mesures de l'absorption par immersion totale pour les quatre formulations du mortier d'étude.

Tableau III.6. Valeurs de l'absorption par immersion totale.

	MO	MC5%	MC10%	MC15%
Absorption par immersion totale en (%)	11.76	12.07	12.15	12.67

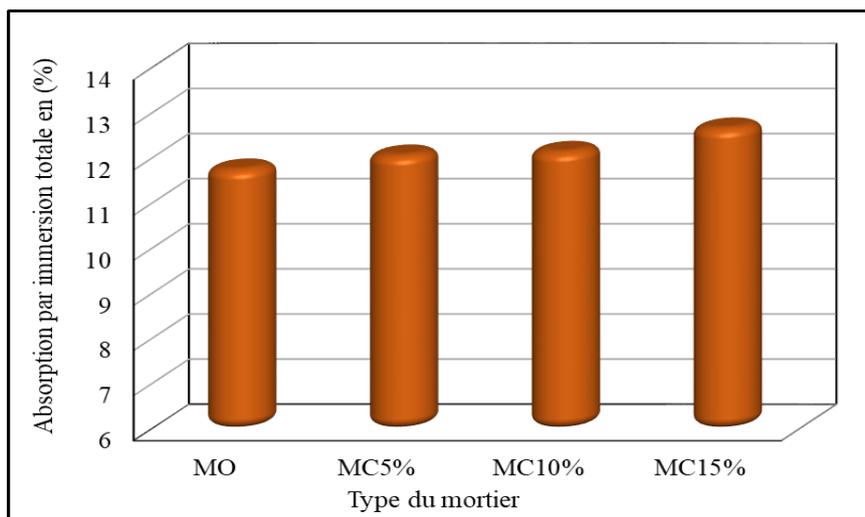


Figure III.7. Valeurs de l'absorption par immersion totale pour les 04 formulations

D'après la figure III.7, on peut remarquer que l'absorption d'eau par immersion totale du mortier ordinaire est plus faible que celle des mortiers modifiés, et elle augmente avec l'augmentation du taux de substitution.

Par rapport au mortier ordinaire, on observe une augmentation de 2.6% pour le MC5% contre une augmentation de 7.7% pour le béton MC15%.

III.2.2.3. Résistance à la compression :

Les moyennes des résistances mécaniques obtenues à 07 jours et 28 jours pour les différentes formules de mortiers testées, sur trois éprouvettes, sont données dans le tableau III.7 et présentées sur la figure III.9.

Tableau III.7. Valeurs de la résistance à la compression.

	MO	MC5%	MC10%	MC15%
Résistance à la compression à 07 jours (MPa)	24.8	22.01	20.97	18.02
Résistance à la compression à 28 jours (MPa)	41.07	35.35	34.36	32.01



Figure III.8. Essai de compression.

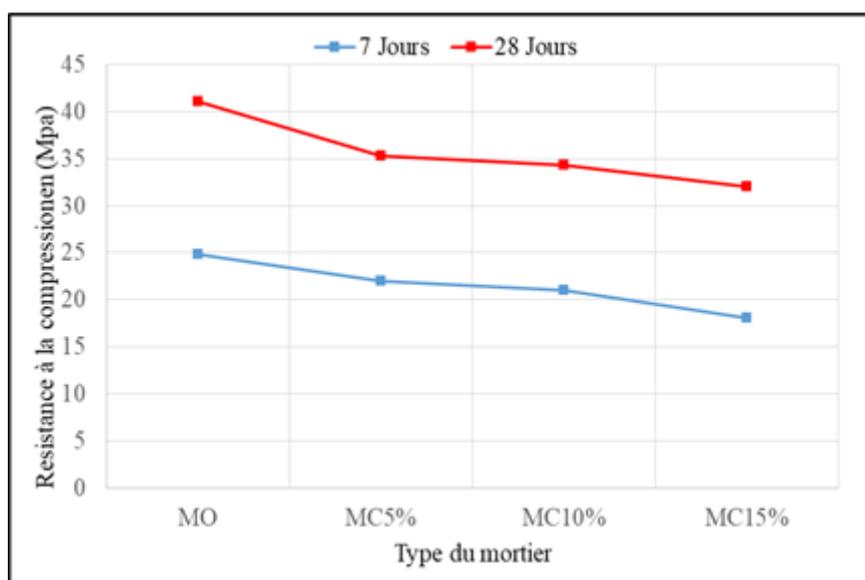


Figure III.9. Valeurs de la résistance à la compression à 7 et 28 jours pour les 04 formulations du mortier étudié.

D'après la figure III.9 on remarque que la substitution d'une partie du ciment par la poudre de coquilles d'œufs s'accompagne d'une baisse de résistance à la compression, cette baisse croît avec l'augmentation du taux de substitution. Au bout de 28 jours de conservation des éprouvettes, la résistance à la compression du mortier de référence (MO) s'élève à 41.07 MPa contre des résistances de 35.35 ; 34.36 et 32.01 MPa pour les mortiers modifiés MC5%, MC10% et MC15%. Donc les écarts constatés varient ainsi entre 2,9 à 34,3%.

III.2.2.4. Résistance à la traction par flexion :

Les résultats de la résistance à la traction par flexion à l'âge de 7 jours et 28 jours de conservation dans l'eau sont présentés dans le tableau et la figure suivants :

Tableau III.8. Valeurs de la résistance à la traction par flexion.

	MO	MC5%	MC10%	MC15%
Résistance à la traction par flexion à 07 jours (MPa)	6.49	6.11	4.61	5.11
Résistance à la traction par flexion à 28 jours (MPa)	8.24	8.07	8.02	7.41



Figure III.10. Essai de traction par flexion.

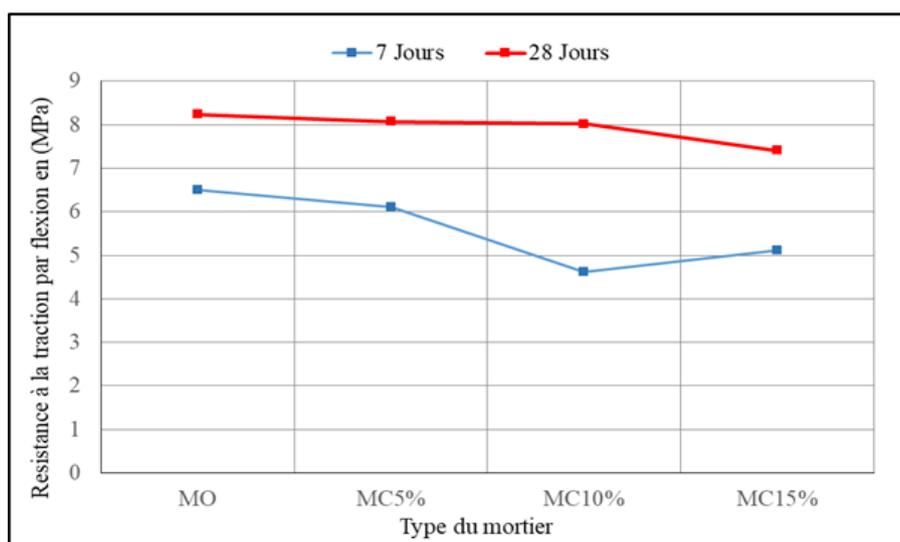


Figure III.11. Valeurs de la résistance à la traction par flexion à 7 et 28 jours pour les 04 formulations du mortier étudié.

Pour la résistance à la traction par flexion, on a observé la même remarque que pour la résistance à la compression, une baisse de la résistance à la traction par flexion des mortiers modifiés par rapport au mortier ordinaire. Cette baisse augmente avec l'augmentation du taux de substitution du ciment par la poudre des coquilles d'œufs. A l'âge de 28 jours, on a constaté une résistance de 8.28 MPa pour le mortier ordinaire (MO) contre une résistance de 8.07 MPa pour le mortier MC5%, une résistance de 8,02 MPa pour le mortier MC10% et une résistance de 7.41 MPa pour le mortier (MC15%), donc une diminution de 2.1% ; 2.7% et 10% respectivement.

III.2.2.5. Essai d'auscultation sonique (ultra-son) :

La vitesse ultrasonique des différents mortiers étudiés est mesurée sur éprouvette cubique ($15 \times 15 \times 15$) cm^3 à l'âge de 28 jours de conservation dans l'eau, les résultats sont présentés dans le tableau III.9 et la figure III.13.

Tableau III.9. Valeurs de l'auscultation sonique.

	MO	MC5%	MC10%	MC15%
Vitesse ultrasonique en (m/s)	3594.0	3618.9	3563.0	3468.4



Figure III.12. Essai d'auscultation sonique

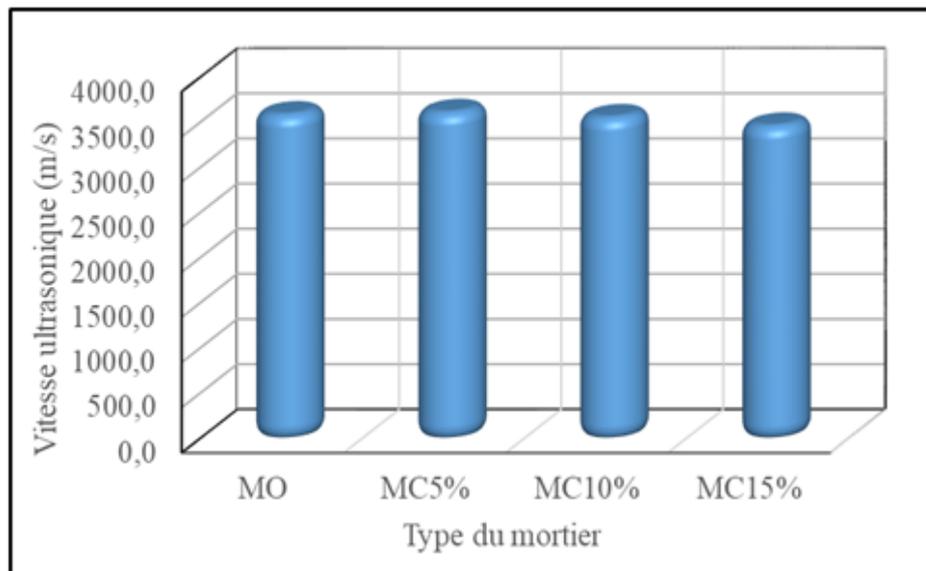


Figure III.13. Valeurs de la vitesse ultrasonique pour les 04 mortiers étudiés.

Selon le tableau II.11 qui donne la relation générale entre la qualité du béton et la vitesse d'impulsion, et d'après les résultats trouvés illustré dans la figure III.13, on peut dire que les vitesses obtenues pour les différentes formulations indiquent que les mortiers étudiés sont de bonne qualité ($V > 3500$ m/s). Sauf pour le mortier MC15% où la vitesse est inférieure de 3500 m/s donc la qualité est assez bonne.

On remarque aussi que la substitution d'une partie du ciment par la poudre de coquilles d'œufs fait diminuer la vitesse de propagation des ultrasons, de l'ordre de 0.9% et 3.5% pour le MC10% et MC15% respectivement. Par contre pour le taux de substitution de 5%, on remarque une légère augmentation de la vitesse de propagation des ultrasons par rapport au mortier ordinaire MO de l'ordre de 0.7%.

III.2.2.6. Essai de porosité accessible à l'eau :

Dans le tableau III.10 et la figure III.14 nous avons rassemblé les résultats des mesures de la porosité accessible à l'eau pour les différentes formulations du béton d'étude.

Tableau III.10. Valeurs de la porosité accessible à l'eau.

	MO	MC5%	MC10%	MC15%
Porosité en (%)	23.3	22.4	22.2	22

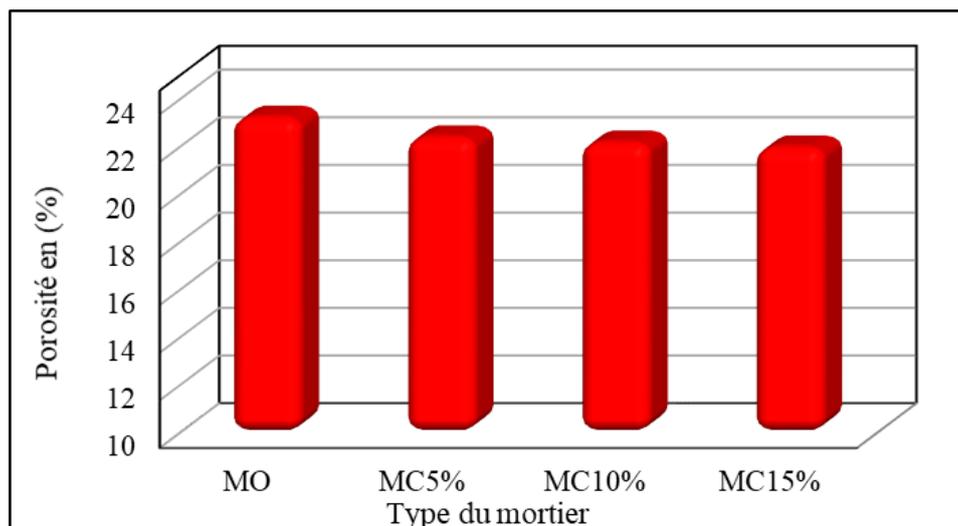


Figure III.14. Valeurs de la porosité accessible à l'eau.

D'après la figure III.14, et par rapport au mortier ordinaire on remarque que la porosité accessible à l'eau des mortiers testés diminue avec l'augmentation du taux de substitution du ciment par la poudre des coquilles d'œuf. On enregistre ainsi une porosité de 23.3% pour le mortier ordinaire contre des porosités de 22.4% ; 22.2% et 22% pour les mortiers MC5% ; MC10% et MC15% respectivement, soit des diminutions de 3.6% ; 4.5% et 5.4% respectivement.

III.2.2.7. Absorption d'eau par capillarité :

Les valeurs de l'essai d'absorption d'eau par capillarité pour les différentes compositions des mortiers étudiés sont présentées dans le tableau et la figure suivants :

Tableau III.11. Valeurs d'absorption capillaire en fonction du temps.

	0min	1min	4min	9min	16min	25min	36min	49min	64min	2h	4h	8h	24h	48h
MO	0.0000	0.0004	0.0008	0.0011	0.0016	0.0020	0.0026	0.0030	0.0035	0.0049	0.0068	0.0095	0.0148	0.0194
MC5%	0.0000	0.0004	0.0009	0.0012	0.0017	0.0021	0.0026	0.0030	0.0034	0.0044	0.0056	0.0075	0.0113	0.0148
MC10%	0.0000	0.0004	0.0008	0.0013	0.0016	0.0021	0.0024	0.0027	0.0031	0.0039	0.0049	0.0066	0.0105	0.0140
MC15%	0.0000	0.0002	0.0004	0.0006	0.0008	0.0010	0.0013	0.0015	0.0018	0.0024	0.0035	0.0056	0.0103	0.0138

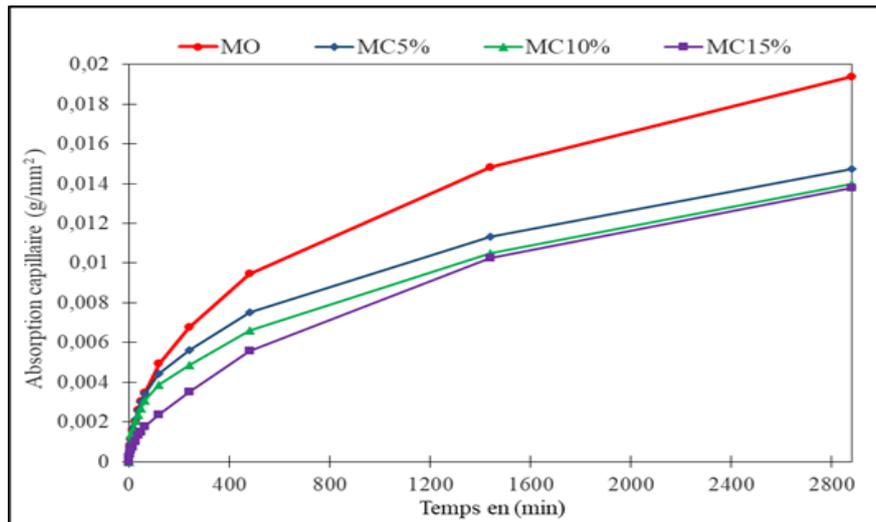


Figure III.15. Variation de l'absorption capillaire en fonction du temps.

D'après la figure III.15, on remarque que la substitution d'une partie de ciment par la poudre de coquilles d'œufs réduit la quantité d'eau absorbée au fur et à mesure que le taux de substitution augmente. Après 24 heures la quantité d'eau absorbée par les mortiers MC5%, MC10% et MC15% a diminué respectivement de 23.7% ; 29.2% et 30.9% par rapport à celle du mortier de référence MO.



Figure III.16. Essai d'absorption d'eau par capillarité.

III.2.2.8. Perméabilité à l'eau (profondeur de pénétration d'eau sous pression) :

La perméabilité représente la capacité d'un matériau poreux à être traversé par un fluide sous un gradient de pression.

Les variations de la profondeur de pénétration de l'eau pour les quatre bétons étudiés à 28 jours sont indiquées dans le tableau II.12 et la figure III.18.

Tableau III.12. Valeurs de profondeur de pénétration d'eau.

	MO	MC5%	MC10%	MC15%
Profondeur de pénétration d'eau (cm)	15	14.5	11.9	11.2



Figure III.17. Essai de perméabilité à l'eau.

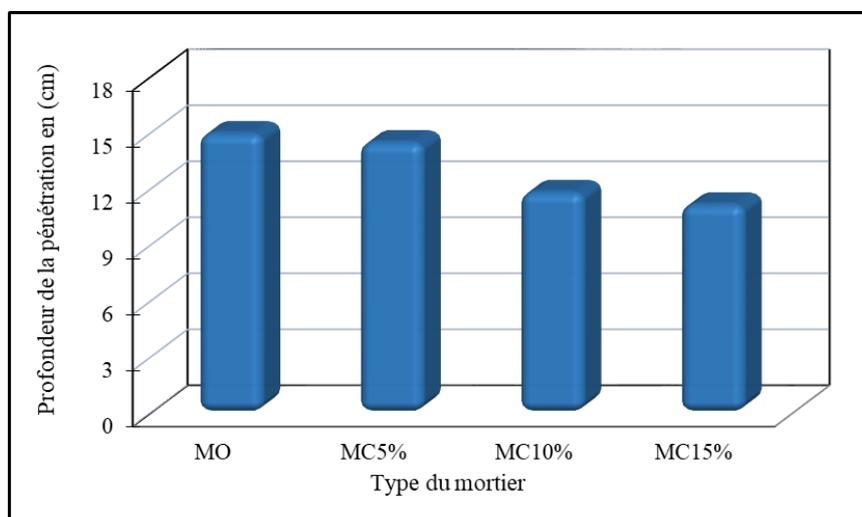


Figure III.18. Profondeur de la pénétration d'eau pour les 04 formulations du mortier d'étude.

On remarque que la profondeur de pénétration de l'eau des mortiers contenant la poudre de coquilles d'œufs est inférieure à celle du mortier ordinaire, et qu'elle diminue avec l'augmentation du taux de substitution. Elle passe de 15cm pour le mortier ordinaire à 14.5cm ; 11.9cm et 11.2cm pour les mortiers MC5% ; MC10% et MC15% respectivement. Exprimée en pourcentage, les taux de diminution constatés sont de 3.2% ; 21% et 25.4% lors de la

substitution massique du ciment par 5% ; 10% et 15% de la poudre des coquilles d'œufs respectivement.

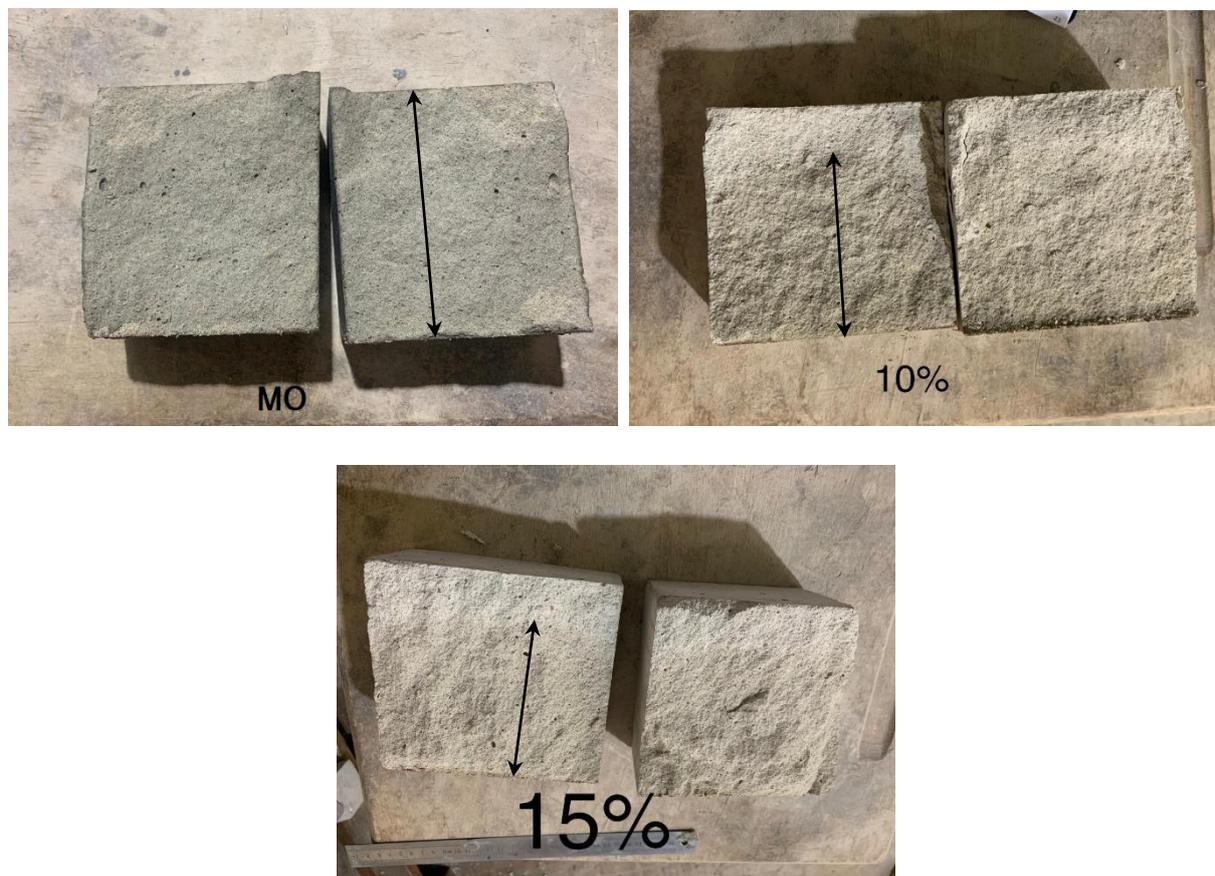


Figure III.19. Mesure de la profondeur de la pénétration d'eau pour les mortiers MO, MC10%, MC15%.

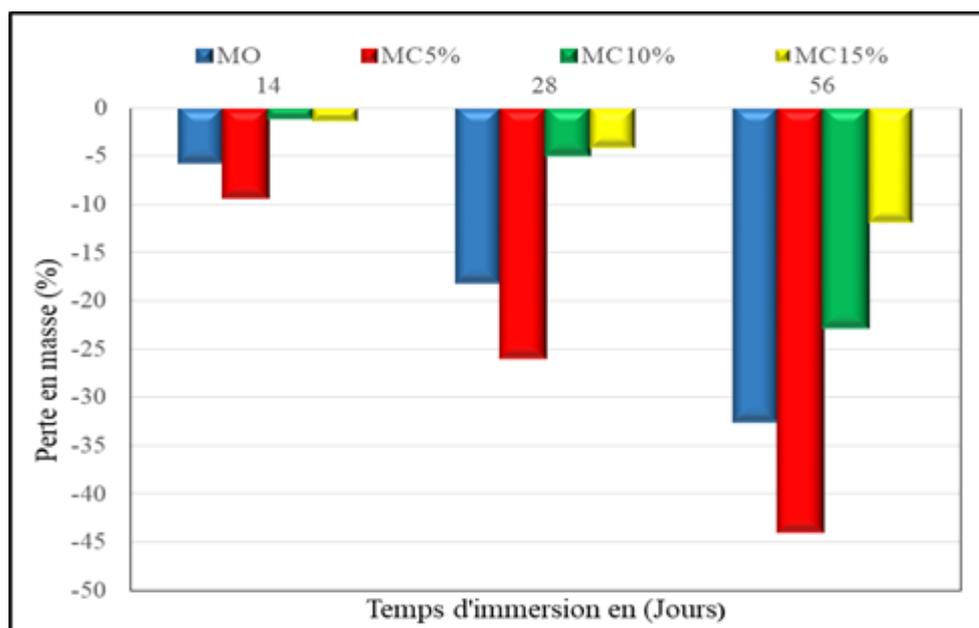
III.2.2.9. Essai d'attaque acide :

L'acide sulfurique est un acide minéral fort et peu volatil dont la formule chimique est (H_2SO_4). Certains types de structures en génie civil peuvent être pendant leur phase de services exposés à l'acide sulfurique par la pluie acide issue de l'émission de gaz de dioxyde de soufre, qui se transforme en acide sulfurique dans la présence de l'eau.

Les pertes de masses constatées au bout de 14, 28 et 56 jours pour les quatre compositions ont été regroupées dans le tableau III.13 et présentées sur la figure III.20 :

Tableau III.13. Valeurs de la perte en masse des différents des mortiers étudiés.

		MO	MC5%	MC10%	MC15%
Perte en masse (%)	14 jours	- 5.73	- 9.29	-1.13	- 1.45
	28 jours	-18.03	- 25.81	- 4.89	- 4.16
	56 jours	-32.44	- 43.83	- 22.65	- 11.82

*Figure III.20. Variation de la masse des mortiers en fonction du temps d'immersion dans l'acide sulfurique.*

D'après les résultats de l'essai de perte de masse présentés sur la figure III.20, on remarque que les 04 mortiers étudiés subissent une perte de masse. Par rapport au mortier ordinaire, Cette perte est plus importante dans le cas du mortier avec 5% de substitution, et commence à diminué à partir du taux de substitution de 10%.

A titre d'exemple, après 28 jours de conservation dans la solution d'acide sulfurique, on a constaté une perte de masse de l'ordre de 18.03% pour le mortier MO, contre une perte en masse de l'ordre de 25.81% pour le MC5% et une perte de 4.89% et 4.16% pour le MC10% et MC15% respectivement.

En termes de ration, à l'âge de 28 jours la perte en masse est augmentée par 43% pour le mortier MC5% et diminuée par 72.9% et 76.9% pour les mortiers MC10% et MC15% par rapport à celle du mortier ordinaire (MO).



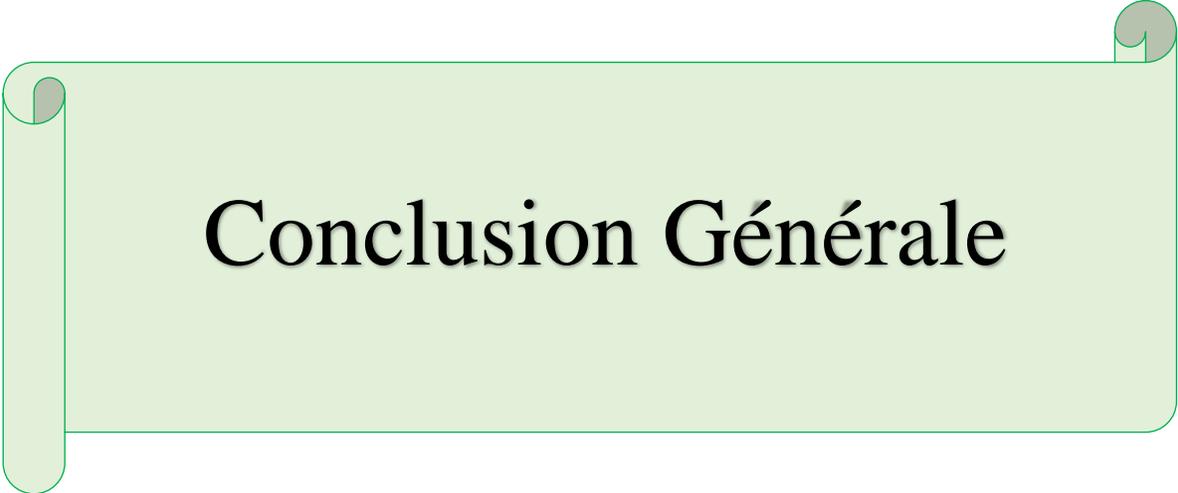
Figure III.21. L'allure des éprouvettes des 04 compositions du mortier Après 56 jours d'immersion dans la solution H_2SO_4 .

III.3. CONCLUSION :

Les résultats présentés dans ce chapitre montrent l'influence de la substitution d'une partie du ciment par la poudre des coquilles d'œufs sur les propriétés du mortier à l'état frais et à l'état durci. L'analyse de ces résultats nous a permis de tirer les conclusions suivantes :

- La maniabilité du mortier diminue avec un taux de substitution de 5% et augmente pour les taux de substitution 10% et 15%.
- La substitution de 5% du ciment par la poudre des coquilles d'œufs fait diminuer l'air occlus de 20% par rapport au mortier ordinaire.
- La substitution d'une partie du ciment par la poudre des coquilles d'œufs fait augmenter le temps de début et fin de prise et diminue la masse volumique à l'état frais et durci
- La substitution d'une partie du ciment par la poudre des coquilles d'œufs diminue la résistance à la compression, à la traction par flexion et la vitesse de propagation sonore. Plus le taux de substitution est élevé plus les valeurs des propriétés mécaniques diminuent.
- La substitution d'une partie du ciment par la poudre des coquilles d'œufs diminue la quantité d'eau absorbée par capillarité et la perméabilité à l'eau du mortier. Cette diminution augmente avec l'augmentation du taux de substitution.

- La substitution du ciment par des taux de 10% et 15% de la poudre des coquilles d'œufs diminue la perte en masse des mortiers conservés dans une solution d'acide sulfurique.



Conclusion Générale

CONCLUSION GENERALE

Ce travail s'inscrit dans le cadre de la valorisation des déchets comme sources alternatives aux matériaux usuels pour la production des matériaux cimentaires. Il s'appuie sur une étude expérimentale comparative qui a pour objectif d'intégrer les fines de coquilles d'œufs dans la composition des mortiers, et d'étudier leur influence sur le comportement des nouveaux mortiers à l'état frais ainsi qu'à l'état durci.

D'après les résultats obtenus, on peut tirer les conclusions suivantes :

- La substitution d'une partie du ciment par la poudre des coquilles d'œufs augmente le temps de début et fin de prise, ce qui peut être un avantage pour les bétonnages par temps chaud.
- L'absorption par immersion totale des mortiers augmente avec l'augmentation du pourcentage de la poudre des coquilles d'œufs dans le mortier.
- L'utilisation de la poudre de coquilles d'œufs comme substituant partiel du ciment diminue la masse volumique à l'état frais et à l'état durci.
- La substitution d'une partie du ciment par la poudre de coquilles d'œufs diminue la résistance à la compression, à la traction par flexion et la vitesse de propagation sonore. Plus le taux de substitution est élevé plus les valeurs des propriétés mécaniques diminuent. Les meilleures résistances mécaniques pour les mortiers substitués sont atteintes par le mortier MC5%.
- La substitution d'une partie du ciment par la poudre de coquilles d'œufs diminue la quantité d'eau absorbée par capillarité, la porosité et la perméabilité à l'eau. Cette diminution augmente avec l'augmentation du taux de substitution.
- La poudre de coquilles d'œufs joue un rôle important dans la résistance à l'attaque chimique par l'acide sulfurique. Elle diminue la perte de masse du mortier.

D'après les résultats obtenus, on peut conclure que la poudre de coquilles d'œufs permet d'améliorer les propriétés rhéologiques et la durabilité et diminue les propriétés mécaniques des produits cimentaires.

Compte tenu de l'évolution générale vers l'utilisation de produits à haute qualité environnementale, la poudre de coquilles d'œufs peut être valorisée et utilisée pour des matériaux de construction en respectant au mieux les ressources naturelles et l'environnement.