

Ministère de l'Enseignement Supérieur Et de La Recherche Scientifique



Université de Ghardaïa

ordre : 'N° d
N° de série :

Faculté des Sciences et Technologies
Département des Sciences et Technologie

Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de

MASTER

Domaine : *Sciences et Technologies*

Filière : Génie civil

Spécialité : Structure

Thème

**Évaluation des propriétés de mortier incorporant de la
poudre de coquilles d'œufs comme substituant partiel du
ciment**

Soutenu publiquement le : 14/06/2025

Par :

BOUHAMIDA Bouchra & SENISNA Imane

Devant le jury :

Mme Matallah Zineb

M.A.A

Univ. Ghardaïa

Présidente

Mr. Saiti Issam

M.A.A

Univ. Ghardaïa

Examineur

Dr. DEHANE Sarra

M.C.B

Univ. Ghardaïa

Encadreur

Année universitaire : 2024/2025

وَقُلْ رَبِّ زِدْنِي عِلْمًا

الإهداء

الحمد لله حبا و شكرا وامتنانا على البدء والختام

وآخر دعوانا ان الحمد لله رب العالمين

من قال انا لها نالها.... وأنا لها وان أبت رغما عنها أتيت بها لم تكن الرحلة قصيرة ولا ينبغي

لها أن تكون، لم يكن الحلم قريبا ولا الطريق محفوف بالتسهيلات... لكن انا هنا وقد فعلتها.

أهدي هذا النجاح لنفسك أولا ثم إلى كل من سعى معي لإتمام هذه المسيرة دمت لي سنداً لا عمره.

وبكل حب اهدي تخرجي إلى من كلله الله بالهيبة والوقار إلى النور الذي انار دربي والسراج الذي لا ينطفئ نوره

والذي بذل الغالي والنفيس واستمدت منه قوتي واعتزازي بذاتي من كان السند طيلة مشواري الدراسي

((والدي العزيز حفظه الله)).

إلى من جعل الله الجنة تحت اقدامها وسهلت لي الشدائد بدعائها من دعمتني بلا حدود يا من اختصر الله فيها

كل معاني الرحمة والحنان ، إلى اليد الخفية التي أزالته عن طريقي العقبات ومن ظلت دعواتها تحمل اسمي ليلاً

ونهاراً..... ((والدتي الغالية حفظها الله)).

وإلى من وهبني الله نعمة وجودهم، إلى مصدر قوتي، وأرضي الصلبة، وجدار قلبي المتين...((إخوتي وأختي)).

وإلى من إن ضاقت بي الدنيا وسعت بخطاهم، وإن سقطت، كانوا أول من رفعوني بكلامهم، إلى من رافقني

بالقلب قبل الدرب، صديقاتي ((شيماء، فرح، هبة الرحمان، هيفاء)).

إلى من شاركتني الجهود وتخطت معي العقبات الى رفيقتي في هذا الانجاز((بشرى)).

إلى عائلتي الكريمة شكرا لكم واهديكم هذا النجاح.

طويت صفحة من التعب وسجلت في تاريخي فخرا لا ينسى. لم أعد أتساءل عن ملامح الوصول فقد رأيتها في

عيوني. تلاشت غيوم التعب وابتسم الأفق بعد عتمة الانتظار. ها هي الخطى التي كانت تتعثر أحيانا قد وجدت

مستقرها في قمة الإنجاز، وبين طيات الطريق تنفست سلاماً وفرحاً وامتناناً

إيمان

الإهداء

الحمد لله حبا و شكرا وامتنانا على البدء والختام

وآخر دعوانا ان الحمد لله رب العالمين

إلى عائلتي الكريمة

بكل مشاعر الاحترام والتقدير، أُهدي هذا العمل إلى من كانوا ولا يزالون الداعم الأول لمسيرتي،
والمصدر الأسمى للقيم والمبادئ التي أفخر بها. شكراً لكم على عطائكم غير المشروط، وصبركم النبيل،
ومحبتكم الصادقة. لولاكم، لما وصلت إلى ما أنا عليه اليوم .

الى من شاركتني هذا العمل كل الشكر والتقدير , سعدت بالعمل إلى جانبك، وأتمنى لك دوام التوفيق

والنجاح ((إيمان))

بشرى

Remerciements

Tous d'abord, nous remercions le Dieu Tout-Puissant, qui nous a donné la vie, la santé, la force, et nous a inspiré la volonté de mener à bien ce travail.

encadreur, Dr Dehane Sarra, pour son attention, son aide et ses bons conseils pendant tout ce travail. Son soutien et ses conseils sages nous ont beaucoup aidés. Nous demandons à Dieu de la récompenser pour nous, de la bénir et de lui donner succès dans tout ce qu'Il aime.

Nous tenons également à exprimer nos sincères remerciements aux membres du jury qui ont eu l'honneur d'accepter d'évaluer ce travail.

Nous remercions aussi tout le personnel pédagogique et administratif du département de génie civil et hydraulique de la Faculté des sciences et de la technologie – Université de Ghardaïa – pour leur soutien tout au long de notre période d'études. Nous remercions également le responsable du laboratoire de l'université pour ses précieux conseils.

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

Nous remercions également tous l'équipe du laboratoire L.T.P.S pour leurs efforts et leur grande contribution à la réalisation de ce travail

À nos chers parents, vous êtes la lumière qui éclaire nos chemins et la main douce qui nous soutient dans les moments difficiles. Votre amour et la sincérité de vos prières sont le véritable appui qui nous donne force et motivation pour avancer. Nous demandons à Dieu de vous protéger et de vous garder, et de nous accorder la réussite afin d'être toujours à la hauteur de votre confiance et de contribuer à votre bonheur avec tout notre amour et notre dévouement.

Résumé :

Ce travail de recherche porte sur l'évaluation des effets de la poudre de coquilles d'œufs (PCO) traitée thermiquement, utilisée en tant substituant partiel au ciment, sur les propriétés du mortier à l'état frais et durci. Des pourcentages de remplacement de 3 %, 6 % et 9 % ont été testés, ainsi qu'un mélange combiné contenant 3 % de PCO et 5 % de fumée de silice (FS).

Les résultats ont montré que l'incorporation de PCO entraîne une augmentation de la demande en eau, traduisant une réduction de la maniabilité. En termes de résistance mécanique, une faible substitution (3 %) permet de conserver, voire améliorer légèrement la résistance à la compression à 28 jours, tandis que des taux plus élevés dégradent les performances. Le mélange combiné a montré une résistance comparable à celle du témoin. En termes de durabilité, les résultats révèlent que les mortiers contenant de la PCO présentent une absorption capillaire plus élevée et une résistance faible à l'attaque acide sulfurique (H_2SO_4). Toutefois, l'ajout de fumée de silice (FS) améliore significativement leur comportement, en réduisant leur porosité et en renforçant leur résistance chimique.

Mots-clés : mortier, ciment, coquilles d'œufs, traitement thermique, résistance, durabilité.

المخلص :

يتناول هذا البحث تقييم تأثير مسحوق قشر البيض (PCO) المعالج حرارياً، والمستخدم كبديل جزئي للإسمنت، على خصائص الملاط في حالتيه الطرية والمتصلبة. تم اختبار نسب استبدال تبلغ 3%، 6%، و9%، بالإضافة إلى مزيج مركب يحتوي على 3% مسحوق قشر البيض (PCO) و5% من دخان السيليكا (FS). أظهرت النتائج أن إضافة PCO تؤدي إلى زيادة في الطلب على الماء، مما يعكس انخفاضاً في قابلية التشغيل. من حيث المقاومة الميكانيكية، يسمح الاستبدال بنسبة منخفضة (3%) بالحفاظ على مقاومة الضغط عند 28 يوماً، بل وتحسينها بشكل طفيف، بينما تؤدي النسب الأعلى إلى تدهور الأداء. أما المزيج المركب، فقد أظهر مقاومة مماثلة للعينة المرجعية. وفيما يخص المتانة، أظهرت النتائج أن الملاط المحتوي على PCO سجلت امتصاصاً شعرياً أعلى ومقاومة ضعيفة تجاه الهجوم الحمضي بالكبريت (H_2SO_4). ومع ذلك، فإن إضافة دخان السيليكا (FS) حسّنت بشكل ملحوظ من سلوك هذه الخلطات، من خلال تقليل المسامية وتعزيز المقاومة الكيميائية.

الكلمات المفتاحية: ملاط، إسمنت، قشر البيض، معالجة حرارية، مقاومة، الاستدامة

Abstract:

This study aims to evaluate the effects of treated eggshell powder (ESP), used as a partial cement replacement, on the fresh and hardened properties of mortar. Replacement percentages of 3%, 6%, and 9% were tested, along with a combined mix containing 3% ESP and 5% silica fume (SF).

The results showed that the incorporation of ESP increases water demand, indicating reduced workability. In terms of mechanical strength, a low substitution rate (3%) maintains or slightly improves the 28-day compressive strength, while higher replacement levels lead to performance degradation. The combined mix exhibited compressive strength comparable to the control. Regarding durability, the results revealed that mortars containing ESP exhibit higher capillary absorption and lower resistance to sulfuric acid attack (H_2SO_4). However, the addition of silica fume significantly improved their behavior by reducing porosity and enhancing chemical resistance.

Keywords: mortar, cement, eggshells, thermal treatment, strength, durability.

Notations

°C :	Degrés Celsius
PCO :	Poudre de coquilles d'œufs
FS :	Fumée de silice
CaCO₃ :	Carbonate de calcium
CaO :	Oxydes de calcium
C-S-H :	Silicate de calcium hydraté
Ca(OH)₂ :	Hydroxyde de calcium
C₃S :	Silicate tricalcique
C₃A :	Aluminate tricalcique
CH :	Hydroxyde de calcium
ES :	Équivalent de sable
M_f	Module de finesse
Cu	Coefficient d'uniformité
M_f	Module de finesse
ρ_{app} :	Masse volumique apparente
ρ_{abs} :	Masse volumique absolue
VB :	Valeur de bleu méthylène
LTPS :	Laboratoire des Travaux Publics du Sud

Sommaire

الإهداء	V
Résumé	VII
Notations	IX
Sommaire	X
Liste des Figures	XII
Liste des Photos	XIII
Liste des Graphes	XIII
Liste des Tableaux	XV
Introduction Générale	2
Chapitre I : Étude bibliographique	
Introduction	5
I.1. Valorisation des coquilles d'œuf	5
I.1.1. Applications potentielles des coquilles d'œuf	6
I.1.2. Transformation et traitements des coquilles d'œuf	7
I.1.3. Valorisation des coquilles d'œuf dans le secteur de constructions	8
I.2. Caractéristiques de la poudre de coquille d'œuf et facteurs influençant ses propriétés	11
I.2.1. Composition chimique des coquilles d'œufs	11
I.2.2. Propriétés physiques des coquilles d'œuf	13
I.2.3. Facteurs influençant les caractéristiques des coquilles d'œufs	13
I.3. Effet de la poudre de coquille d'œuf comme substituant partiel du ciment sur les propriétés du matériau cimentaire	17
I.3.1. Propriétés à l'état frais du matériau cimentaire contenant de la poudre de coquille d'œuf	17
I.3.2. Propriétés à l'état durci du matériau cimentaire incorporant de la poudre de coquille d'œuf	19
I.3.3. Durabilité du matériau cimentaire contenant de la poudre de coquille d'œuf	24
Conclusion	26
Chapitre II : Matériaux et Procédures expérimentales	
Introduction	28
II.1. Caractérisation des matériaux utilisés	28

II.1.1. Sable	28
II.1.2. Ciment et ajouts minéraux	33
II.1.2.1. Ciment	33
II.1.2.2. Poudre des coquilles d'œufs (PCO)	34
II.1.2.3. Fumée de silice (FS)	36
II.1.2.4. Analyses des composants cimentaires utilisées	37
II.1.3. Eau de gâchage	39
II.2. Étude de l'influence de la poudre des coquilles d'œufs sur l'hydratation et la stabilité du volume du ciment	39
II.3. Étude de l'influence de la poudre des coquilles d'œufs sur la résistance mécanique du mortier	40
II.3.1. Formulation et Confection des éprouvettes :	40
II.3.2. Résistance mécanique du mortier	41
II.4. Étude de l'influence de la poudre des coquilles d'œufs sur la durabilité du mortier:	42
II.4.1. Absorption capillaire	42
II.4.2. Résistance à l'attaque acide	43
Conclusion	44

Chapitre III Résultats et interprétations

Introduction	46
III.1. Étude de l'effet de la poudre de coquilles d'œufs sur l'hydratation et la stabilité du volume du ciment	46
III.2. Étude de l'effet de Poudre de coquilles d'œufs sur la masse volumique du mortier	49
III.3. Étude de l'effet de la poudre de coquilles d'œufs sur la résistance mécanique du mortier	50
III.4. Étude de la poudre de coquilles d'œufs sur la durabilité du mortier	53
III.4.1. Absorption capillaire	53
III.4.2. Résistance à l'attaque acide	55
Conclusion	57
Conclusion générale	60
Références	62
Annexe	72

Liste des Figures

Figure I . 1 Production mondiale d'œufs en 2023. (Source : FAO, 2025)	5
Figure I . 2 Classification des applications potentielles des coquilles d'œuf. (Source : [Quina et al., 2017])	7
Figure I . 3 Voies de valorisation des coquilles d'œuf. (Source : [Caldeira et al., 2020])	8
Figure I . 4 Valorisation des coquilles d'œuf dans le secteur de construction (Source : Auteurs)	9
Figure I . 5 Variation de couleur de l'PCO en fonction de la température de calcination. (Source : [Mohadi et al., 2016], [Cree et Pliya, 2019])	14
Figure II . 1 Étapes de préparation de poudre de coquilles calcinée. (Source : Auteurs)	35
Figure II . 4 Essai d'absorption capillaire. (Source : Auteurs)	43
Figure III . 1 Aspect visuel des mortiers après immersion dans l'acide. (Source : Auteurs)	57

Liste des Photos

Photo II . 1 Sable utilisé. (Source : Auteurs)	28
Photo II . 2 Analyse granulométrique de sable. (Source : Auteurs)	29
Photo II . 3 Masse volumique apparente de sable. (Source : Auteurs)	31
Photo II . 4 Masse volumique absolue de sable. (Source : Auteurs)	31
Photo II . 5 Essai équivalent de sable. (Source : Auteurs)	32
Photo II . 6 Essai au bleu de méthylène.(Source : Auteurs)	32
Photo II . 7 Ciment utilisé. (Source : Auteurs)	34
Photo II . 9 Fumée de silice. (Source : Auteurs)	36
Photo II . 10 Poudre de coquilles d’œufs après calcination. (Source : Auteurs)	37
Photo II . 11 Mesure des masses volumiques absolues. (Source : Auteurs)	38
Photo II . 12 Essai de prise de ciment. (Source : Auteurs)	39
Photo II . 13 Essai de la stabilité de volume du ciment. (Source : Auteurs)	39
Photo II . 14 Confection des éprouvettes de mortier. (Source : Auteurs)	41
Photo II . 15 Mesure de la résistance mécanique du mortier. (Source : Auteurs)	41
Photo II . 16 Essai de résistance à l’attaque acide. (Source : Auteurs)	44

Liste des Graphes

Graphe I. 1 Influence du temps de broyage sur la densité réelle et la surface spécifique (BET) de l’PCO. (Source : [Baláz et al., 2015], [Tsai et al., 2008])	14
Graphe I. 2 Concentrations de calcium dans l’PCO en fonction de la température de calcination. (Source : [Cree et Rutter, 2015], [Zaman et al., 2018])	16
Graphe I. 3 Variation de la densité de béton en fonction de pourcentage de l’PCO. (Source : [Hama, 2017]).	18
Graphe I. 4 Effet de l’PCO sur les temps de prise de la pâte de ciment. (Source : [Ujin et al., 2016])	18
Graphe I. 5 Variation de la résistance à la compression de béton en fonction de la teneur en PCO (Source : [Yerramala, 2014])	20

Graphe I. 6 Résistance à la compression de mortier incorporant différents pourcentages d'PCO (Source : [Alsharari et al., 2022])	22
Graphe I. 7 Résistance à la traction par fendage de béton incorporant différents pourcentages d'PCO (Source : [Parthasarathi et al., 2017])	22
Graphe I. 8 Résistance à la flexion de mortier incorporant différents pourcentages d'PCO (Source : [Amin et al., 2023])	24
Graphe I. 9 Variation de pourcentage d'absorption des bétons contenant différents pourcentages d'PCO (Source : [Yerramala, 2014])	25
Graphe I. 10 Perte de masse sous l'attaque d'acide (Source : [Beng We et al., 2020])	25
Graphe II. 1 Analyse granulométrique de sable. (Source : Auteurs)	30
Graphe II. 2 Procédure de calcination. (Source : Auteurs)	35
Graphe III. 1 Variation des temps de prises en fonction du pourcentage de la poudre de coquilles d'œufs (PCO). (Source : Auteurs)	46
Graphe III. 2 Variation de la masse volumique avec le pourcentage de la poudre de coquilles d'œufs (PCO). (Source : Auteurs)	49
Graphe III. 3 Variation de la résistance à la compression du mortier en fonction du pourcentage de la poudre de coquilles d'œufs (PCO). (Source : Auteurs)	51
Graphe III. 4 Variation de la résistance à la traction du mortier en fonction du pourcentage de la poudre de coquilles d'œufs (PCO). (Source : Auteurs)	53
Graphe III. 5 Effet de la poudre de coquilles d'œufs (PCO) sur l'absorption capillaire de mortier. (Source : Auteurs)	54
Graphe III.6 Perte de la résistance à la compression sous attaque acide. (Source : Auteurs)	55

Liste des Tableaux

Tableau I. 1 Composition chimique des coquilles d'œufs.	12
Tableau I. 2 Propriétés physiques des coquilles d'œufs.	13
Tableau I. 3 Propriétés physiques des coquilles d'œufs.	19
Tableau II. 1 Analyse granulométrique de sable. (Source : Auteurs)	29
Tableau II. 2 Résultats des masses volumiques de sable. (Source : Auteurs)	31
Tableau II. 3 Résultats des essais de propreté. (Source : Auteurs)	32
Tableau II. 4 Analyses chimiques de sable. (Source : Auteurs)	33
Tableau II. 5 Caractéristiques chimiques et minéralogiques du ciment. (Source : [LAFARGE, 2025])	33
Tableau II. 6 Caractéristiques chimiques de la fumée de silice.	36
Tableau II.7 Masses volumiques des matériaux cimentaires. (Source : [TeknaChem, 2025])	38
Tableau III. 1 Effet de la poudre de coquilles d'œufs (PCO) sur l'hydratation et la stabilité du volume du ciment(SourceAuteurs)	47
Tableau III. 2 Résistance mécanique du mortier en fonction du pourcentage de la poudre de coquilles d'œufs (PCO). (Source : Auteurs)	50
Tableau III. 3 Variation de l'absorptivité du mortier en fonction du pourcentage de la poudre de coquilles d'œufs (PCO). (Source : Auteurs)	54

Introduction Générale

Introduction Générale

Les matériaux cimentaires sont largement utilisés dans le secteur de la construction, où le composant principal est le ciment. Cependant, la production de ce ciment est non seulement coûteuse, mais elle contribue également de manière significative aux émissions de gaz CO₂. En effet, la fabrication d'une tonne de ciment génère environ une tonne de dioxyde de carbone (CO₂) [Cree et Pliya, 2019], ce qui en fait l'un des matériaux de construction les plus polluants.

Par conséquent, des efforts considérables sont consacrés à l'étude de l'utilisation de sous-produits industriels comme matériaux de substitution de ciment [Tan et al., 2018]. Les résultats ont montré que des ajouts tels que les pouzzolanes volcaniques, les cendres volantes, le laitier de haut fourneau granulé, la fumée de silice, le métakaolin ou encore le calcaire permettent non seulement d'améliorer les propriétés des matériaux cimentaires, mais aussi de réduire leur coût de production [Sathiparan, 2021].

Les coquilles d'œufs sont des déchets solides principalement issus de l'industrie agroalimentaire, et souvent rejetée sans traitement, contribuant ainsi à la pollution environnementale. Le principal constituant des coquilles d'œufs est le carbonate de calcium (CaCO₃) et présente une composition chimique proche à celui du calcaire naturel [Yerramala, 2014]. Cela rend les coquilles d'œufs particulièrement intéressantes comme alternative à la chaux naturelle dans le domaine de la construction. Cela permet non seulement de réduire l'utilisation du ciment et de préserver les ressources en chaux naturelle, mais aussi de valoriser un déchet agroalimentaire abondant [Jaber et al., 2020].

Dans ce contexte, le présent travail vise à étudier l'influence de l'incorporation de la poudre de coquilles d'œufs sur les propriétés physiques, mécaniques et de durabilité des mortiers. Cette étude a pour but de renforcer les connaissances sur les effets de l'utilisation de la poudre de coquilles d'œufs sur les propriétés des matériaux cimentaires, à travers une série des essais expérimentale. Celles-ci comprennent des essais de temps de prise, de résistances mécaniques, d'absorption d'eau, et de résistance aux environnements agressifs.

Malgré l'intérêt croissant pour la valorisation des déchets naturels dans les matériaux de construction, l'intégration de ce type de résidus dans les formulations cimentaires continue de susciter de nombreuses interrogations, notamment en ce qui concerne son impact direct sur les performances globales du mortier et la stabilité de ses propriétés mécaniques dans le temps. Il

est supposé qu'un faible pourcentage d'ajout pourrait contribuer à l'amélioration de la résistance mécanique, tandis qu'un dosage plus élevé risquerait d'entraîner une diminution de la compacité et de la résistance. Par ailleurs, la présence de carbonate de calcium sous forme de poudre pourrait altérer le processus d'hydratation et influencer le comportement du mortier face à l'humidité et aux environnements agressifs. Un traitement thermique préalable des coquilles, notamment à haute température, est également envisagé comme une solution permettant d'améliorer leur réactivité et leur compatibilité avec la matrice cimentaire.

Ce mémoire débute par une introduction générale et se divise en trois chapitres structurés comme suit :

Le **premier chapitre** consiste en une étude bibliographique qui présente les applications de la coquille d'œuf, ses méthodes de transformation, de calcination et ses utilisations dans le domaine de la construction, ainsi que ses propriétés et les facteurs influençant son effet en tant que substitut partiel du ciment selon les études antérieures.

Le **deuxième chapitre** décrit les matériaux utilisés dans la confection des mortiers, leurs caractéristiques, ainsi que le programme expérimental réalisé.

Le **troisième chapitre** est consacré à la présentation et à l'interprétation des résultats des essais effectués sur les différentes formulations étudiées.

Enfin, ce mémoire se termine par une conclusion générale résumant les résultats obtenus, ainsi que des perspectives permettant d'approfondir et d'améliorer les travaux présentés.

Chapitre I.

Étude bibliographique

Chapitre I : Étude bibliographique

Introduction :

L'utilisation de matériaux alternatifs dans l'industrie du ciment est devenue une nécessité face aux défis environnementaux croissants. Parmi ces matériaux, la poudre de coquille d'œuf suscite un intérêt particulier en raison de sa teneur élevée en carbonate de calcium et de son potentiel en tant que substitut partiel du ciment.

Ce chapitre examine les différentes possibilités de valorisation des coquilles d'œuf, notamment dans le secteur de la construction. Il présente leurs modes de transformation, leurs propriétés chimiques et physiques, ainsi que leurs effets potentiels sur les performances et la durabilité des matériaux cimentaires.

I.1. Valorisation des coquilles d'œuf : potentiels, traitements et applications

La consommation mondiale d'œufs ne cesse d'augmenter en raison de leur forte valeur nutritive et de leur accessibilité économique. La Figure I.1 présente la production d'œufs par pays dans le monde en 2023. En Algérie la consommation annuelle dépasse les 300 000 tonnes [FAO, 2025] . Cette production massive génère une quantité considérable de déchets sous forme de coquilles d'œuf, dont la gestion représente un véritable défi pour un environnement plus sain.

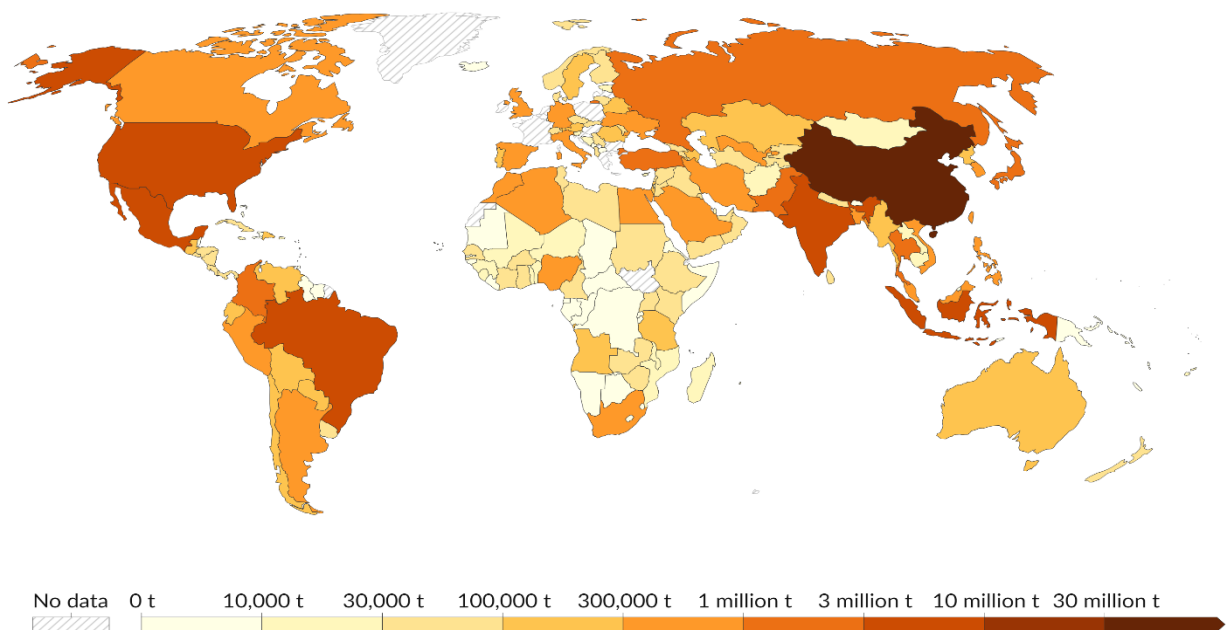


Figure I. 1 Production mondiale d'œufs en 2023. (Source : FAO, 2025)

L'élimination inappropriée de ces déchets dans des décharges ouvertes peut entraîner des problèmes environnementaux et sanitaires, notamment des odeurs désagréables et la prolifération de mouches et des rats [Francis et Abdel Rahman, 2016]. De plus, la saturation progressive des décharges et les coûts supplémentaires liés à la gestion de ces déchets renforcent la nécessité de leur recyclage dans diverses applications.

I.1.1. Applications potentielles des coquilles d'oeuf :

Les coquilles d'œufs, principalement composées de carbonate de calcium (CaCO_3), possèdent des propriétés intéressantes qui leur permettent d'être utilisées dans divers domaines. Ces dernières années, de nombreuses applications potentielles des coquilles d'œufs ont été identifiées, allant d'applications à faible investissement, comme leur utilisation comme additif alimentaire, à des procédés plus complexes tels que l'immobilisation des métaux lourds et la fabrication d'implants osseux et dentaires [Sathiparan, 2021].

Selon Quina et al. [Quina et al., 2017] (Figure I.2), les coquilles d'œufs peuvent principalement être valorisées en tant que :

- a. **Matières premières** : Elles peuvent être utilisées dans divers domaines industriels, notamment comme :
 - **Additifs alimentaires** : utilisées comme source de calcium pour l'enrichissement des aliments destinés à la consommation humaine et animale.
 - **Amendements du sol** : utilisées pour fertiliser ou conditionner le sol afin d'améliorer sa qualité en apportant du calcium.
 - **Cosmétiques** : la membrane de coquille d'œuf est riche en fibres de collagène, ce qui lui permet d'améliorer l'efficacité des produits cosmétiques.
 - **Biomatériaux** : l'hydroxyapatite, issue de la transformation des coquilles d'œufs, possède une structure chimique similaire à celle des os et des dents, ce qui la rend idéale pour les implants orthopédiques et dentaires.
 - **Composites** : l'hydroxyapatite peut être utilisée comme charge ou renfort dans des matrices polymères, afin d'améliorer leurs propriétés mécaniques et biologiques, notamment pour des applications biomédicales.
 - **Carbonate de calcium purifié** : utilisé dans le secteur de la construction, dans l'industrie papetière comme agent de charge pour améliorer la brillance et la douceur du papier, ainsi que dans la fabrication du verre et des peintures.

b. Matières consommables : Elles peuvent être utilisées dans diverses applications, notamment comme :

- **Catalyseurs :** l'oxyde de calcium (CaO) obtenu après calcination des coquilles d'œufs est un catalyseur efficace pour les réactions basiques. Il est utilisé notamment pour la production de biodiesel, la synthèse du carbonate de diméthyle. Le carbonate de calcium est plus efficace pour l'isomérisation du lactose en lactulose.
- **Absorbants :** les coquilles d'œufs, riches en carbonate de calcium (CaCO₃), peuvent être utilisées comme absorbants pour l'élimination des polluants organiques et inorganiques (comme les métaux lourds) dans l'eau, les eaux usées et les sols. Le CaO issu de leur calcination est aussi un bon absorbant pour la capture du CO₂.

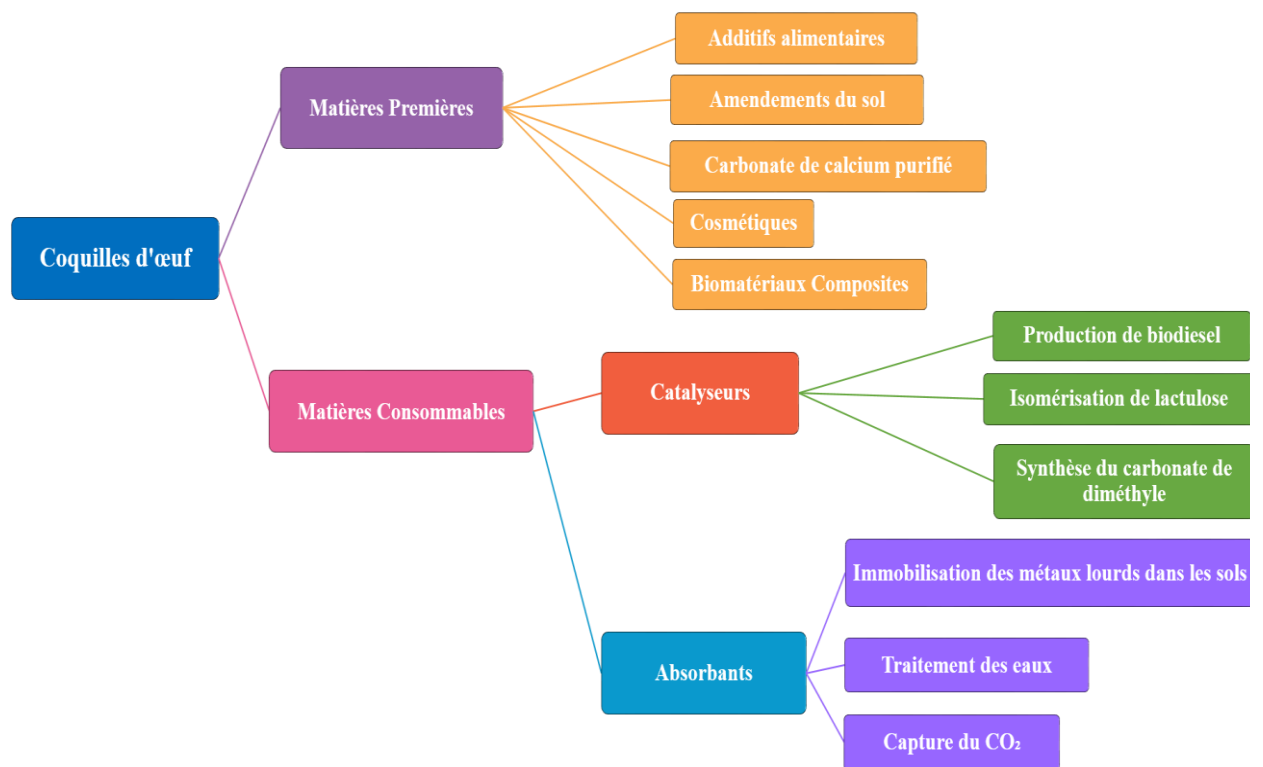


Figure I. 2 Classification des applications potentielles des coquilles d'œuf. (Source : [Quina et al., 2017])

I.1.2. Transformation et traitements des coquilles d'œuf :

La valorisation des coquilles d'œuf implique plusieurs étapes de traitement permettant d'obtenir différents composés aux applications variées [Caldeira et al., 2020] (Figure I.3):

- **Lavage, broyage et centrifugation :** constituent les étapes initiales du traitement des coquilles d'œuf. Elles permettent d'éliminer les impuretés, de réduire leur taille pour

une utilisation ultérieure et de séparer la membrane interne afin d'obtenir le carbonate de calcium.

- **Broyage en présence d'acide phosphorique et de gélatine** : cette méthode permet d'obtenir différentes structures de phosphates de calcium.
- **Calcination** : consiste d'un chauffage à haute température des coquilles d'œuf pour provoquer la décomposition du carbonate de calcium en oxyde de calcium (CaO).
- **Incorporation dans une résine polyester insaturée** : les coquilles d'œuf broyées peuvent être ajoutées à une résine polyester insaturée en présence de peroxyde de méthyléthylcétone comme catalyseur. Cette réaction permet la polymérisation de la résine et la formation d'un composite en résine polyester.

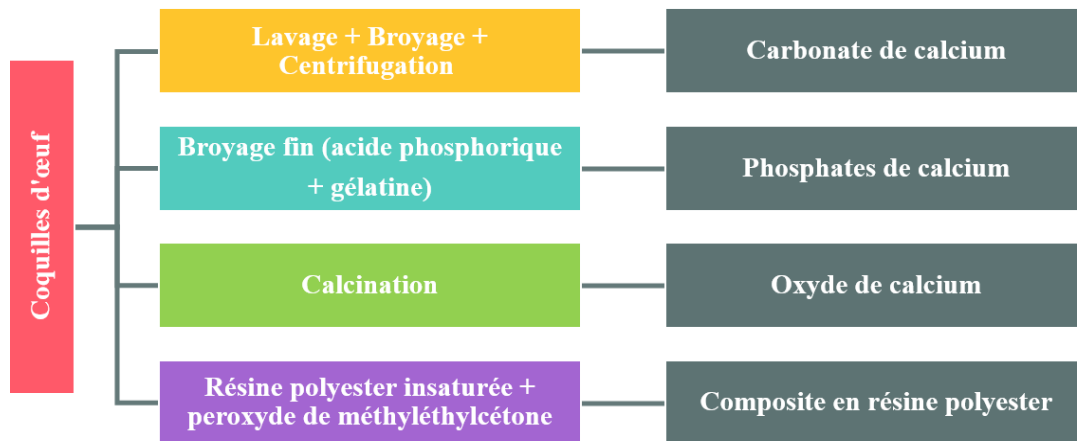


Figure I. 3 Voies de valorisation des coquilles d'œuf. (Source : [Caldeira et al., 2020])

I.1.3. Valorisation des coquilles d'œuf dans le secteur de constructions:

Les coquilles d'œuf trouvent des usages variés dans le domaine de la construction principalement sous forme de poudre (Figure I.4) :

A. Poudre de coquilles d'œuf comme ajout cimentaire :

La poudre de coquille d'œuf (noté dans la suite PCO) est principalement composée de carbonate de calcium (CaCO_3) [Tsai et al., 2008]. Elle est obtenue après broyage et tamisage à une granulométrie voulue. En raison de sa richesse en calcium et de sa structure minérale similaire à celle du calcaire [Yerramala, 2014], PCO peut être utilisée comme une alternative à la chaux dans les ciments à base de calcaire.

Lorsqu'elle est calcinée à haute température, le carbonate de calcium se décompose en oxyde de calcium (CaO), qui entre également dans la composition du ciment. Cette

transformation permet d'envisager l'PCO comme un additive ou de substitution dans les formulations de ciment.

En raison de ses avantages écologiques, notamment la réduction de l'extraction des ressources naturelles et de l'empreinte environnementale des matériaux de construction, une attention particulière a été accordée ces dernières années à l'étude de l'application d'PCO en tant que substitut du ciment pour la production de béton [Md Zain *et al.*, 2021], de mortier [Pliya *et Cree*, 2015], des briques de terre stabilisées au ciment [Amaral *et al.*, 2013] et des blocs de maçonnerie [Commey, 2019].

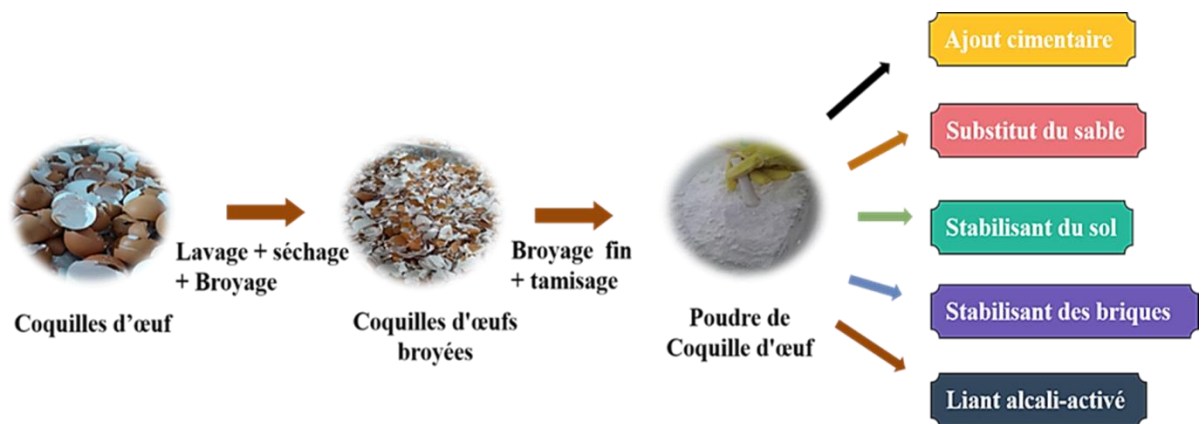


Figure I. 4 Valorisation des coquilles d'œuf dans le secteur de construction (Source : Auteurs)

B. Poudre de coquille d'œuf comme substitut du sable :

L'PCO peut également être employée comme substitut partiel du sable dans le béton et le mortier conventionnels. Razali *et al.* [Razali *et al.*, 2020] ont étudié les performances de cette substitution en remplaçant le sable avec de l'PCO calcinée à 900°C pour produire de l'oxyde de calcium (CaO). Les résultats ont montré une amélioration de la résistance à la compression de béton avec l'augmentation de pourcentage de substitution. Bhuvaneswari [Bhuvaneswari, 2018] a constaté que 20 % d'PCO en remplacement partiel du sable est un pourcentage idéal pour améliorer les performances du béton. En revanche, Binici *et al.* [Binici *et al.*, 2015] ont constaté une diminution des résistances à la compression et à la flexion des mortiers de ciment avec l'augmentation de pourcentage de remplacement du ciment par l'PCO.

C. Poudre de coquille d'œuf comme stabilisant du sol :

La stabilisation des sols consiste à améliorer certaines de leurs propriétés afin d'améliorer leurs performances géotechniques, notamment l'angle de frottement, la cohésion, la limite de liquidité, l'indice de plasticité, la résistance, la compressibilité et la perméabilité [Sathiparan,

2021]. Le ciment et la chaux sont les liants stabilisant les plus couramment utilisés, qu'ils puissent être employés seuls ou en combinaison [Ojuri, 2017]. Dans cette perspective, l'PCO apparaît comme un stabilisant alternatif intéressant en raison de sa richesse en carbonate de calcium (CaCO_3) ou après transformation en oxyde de calcium (CaO).

Plusieurs études ([Oluwatuyi et al., 2018], [Prusinski et Bhattacharja, 1999], [Sharma et Sivapullaiah, 2016], [Surjandari et al., 2018]...) ont exploré l'utilisation de l'PCO comme stabilisant de sol, soulignant l'importance du comportement du matériau, les améliorations prometteuses des propriétés du sol ainsi que son potentiel d'utilisation dans la construction de routes et de fondations.

D. Poudre de coquille d'œuf comme stabilisant des briques de terre :

Les briques en terre crue et en terre cuite comptent parmi les matériaux de construction les plus anciens et les plus répandus. Cependant, elles présentent des inconvénients majeurs tels qu'une faible résistance mécanique, une stabilité dimensionnelle limitée et une forte absorption d'eau. Par conséquent, elles nécessitent l'application de techniques de stabilisation pour améliorer leurs performances et leur durabilité. Le ciment et la chaux sont les stabilisants les plus couramment utilisés à cet effet [Malkanthi et al., 2020].

Quelques études ont été menées sur l'utilisation de l'PCO comme stabilisant pour les briques en terre crue et en terre cuite. Les résultats montrent que l'ajout d'PCO entraîne une réduction significative du taux d'absorption d'eau ([Adogla et al., 2016], [Ing et al., 2017]) ainsi qu'une amélioration de la résistance à la compression de ces matériaux [Tangboriboonet et al., 2019].

E. Poudre de coquille d'œuf comme liant alcali-activé :

Les liants alcali-activés constituent une alternative aux liants traditionnels comme le ciment Portland. Ils sont obtenus par dissolution de l'alumine et de la silice issues d'un précurseur en présence d'une solution activatrice alcaline [Palomo et al., 1999]. Les précurseurs géopolymériques sont des matériaux riches en aluminosilicates, tels que les cendres volantes de charbon, le laitier et l'argile calcinée. En général, les silicates et hydroxydes de sodium (Na_2SiO_3 , NaOH) ou de potassium (K_2SiO_3 , KOH) sont utilisés comme activateurs alcalins [Shekhawat et al., 2019].

La présence de CaO dans l'PCO favorise la formation de silicate de calcium hydraté (C-S-H). En général, l'PCO est combinée avec des matériaux riches en silice, tels que les cendres

volantes et la cendre de balle de riz, pour être utilisée comme liant alcali-activé [Sathiparan, 2021].

Un nombre limité d'études ([Shekhawat *et al.*, 2019], [Mashri *et al.*, 2020]) a été mené pour tirer des conclusions solides sur les propriétés mécaniques et la durabilité des géopolymères à base de poudre de coquilles d'œuf (PCO).

I.2. Caractéristiques de la poudre de coquille d'œuf et facteurs influençant ses propriétés :

La coquille d'œuf est l'enveloppe externe dure d'un œuf, représentant environ 11 % de son poids total [Sathiparan, 2021]. Elle est constituée d'un réseau de fibres protéiques associées à des cristaux de calcite [Quina *et al.*, 2016]. Certaines propriétés des PCO déterminées dans des études précédentes sont rapportées dans les paragraphes suivants.

I.2.1. Composition chimique des coquilles d'œufs:

La coquille d'œuf est composée de 94 % de carbonate de calcium, 1 % de phosphate de calcium, 1 % de carbonate de magnésium et 4 % de matière organique [Hamada *et al.*, 2020]. Le Tableau I.1 présente de manière détaillée la composition chimique de l'PCO.

Le Tableau I.1 montre que l'PCO présente une teneur en calcium très élevée. De plus, la méthode de traitement influence considérablement sa composition en calcium. Lorsque les coquilles d'œufs sont broyées et séchées au four, elles contiennent environ 50 % de calcium. Cependant, après calcination, cette teneur peut atteindre 65 à 75 % [Sathiparan, 2021]. Par calcination, le carbonate de calcium (CaCO_3) se décompose pour former de l'oxyde de calcium (CaO), également appelé chaux vive, comme décrit dans l'équation (I.1) :



L'PCO contient seulement de faibles quantités d'oxyde de silicium (SiO_2), raison pour laquelle il n'est pas considéré comme un matériau pouzzolanique [Hamada *et al.*, 2020]. Ainsi, d'un point de vue chimique, l'PCO peut être considérée comme un matériau naturel à base de carbonate [Freire et Holanda, 2006].

Tableau I. 1 Composition chimique des coquilles d'œufs.

Référence	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	Cl	K ₂ O	SO ₃	MgO	P ₂ O ₅	SrO	Perte au feu
[Parthasarathi et al., 2017]	0.09	50.7	0.03	0.02	0.19	0.21		0.57	0.01	0.24	0.13	
[Yerramala, 2014]	0.08	52.1	0.03	0.02	0.15	0.01		0.62	0.01			45.4
[Amin et al., 2023]	0.15	83.2	0.28	0.18	0.11		0.06	0.25	0.1	0.55	0.38	14.5
[Tan et al., 2018]	0.61	62.35	0.07	0.63			0.22	1.32	0.36			
[Ujin et al., 2016]	0.08	53.6	0.04	0.02	0.13			0.61	0.01			
[Arif et al., 2021]	0.58	52.1	0.06	0.02	0.15		0.25	0.62	0.06			45.42
[Khalid et al., 2018]	0.05	98	0.05	0.02			0.11	0.49	1.12	0.10		
[Hama, 2017]	0.13	50.09	0.03	0.3	0.16			0.61	0.02			
[Freire et Holanda, 2006]	0.09	50.7	0.03	0.02	0.19	0.08		0.57	0.01	0.24	0.13	47.8
[Beck et al., 2010]	0.00	72.33	0.00	0.00	0.16		0.07		0.84	0.23		24.22
[Pliya et Cree, 2015]		97.8				0.03		0.063				0.067
[Brahimi et al., 2020]	0.06	63.69	0.04	0.01			0.04		0.57			

I.2.2. Propriétés physiques des coquilles d'œuf :

Les propriétés physiques des coquilles d'œuf varient en fonction de leur origine [Hamada et al., 2020]. Le Tableau I.2 présente les propriétés physiques de l'PCO rapportées dans des études antérieures.

Tableau I. 2 Propriétés physiques des coquilles d'œufs.

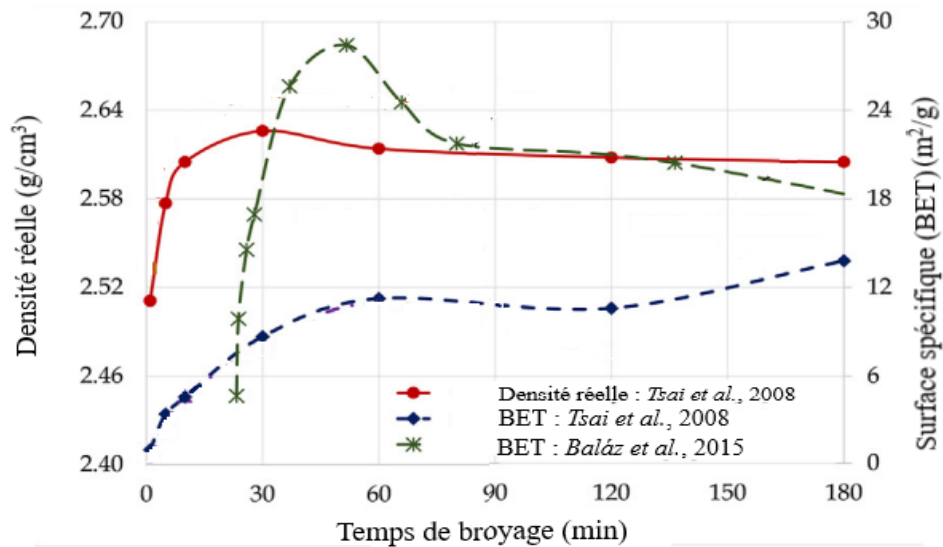
Référence	Densité	Masse volumique (Kg/m ³)	Finesse (m ² /Kg)
[Yerramala, 2014]	2.37		
[Amin et al., 2023]	2.1	1250	
[Pliya et Cree, 2015]	2.5		307
[Cree et Pliya, 2019]		2500	367
[Hama, 2017]	2.07		
[Freire et Holanda, 2006]	2.47		
[Beck et al., 2010]	2.26	410	955

Comme mentionné dans le Tableau I.2, la densité de l'PCO varie de 2.07 à 2.5, ce qui est inférieur à celle du ciment, qui est en moyenne 3,15 [Kosmatka et Wilson., 2011]. Les valeurs varient considérablement en fonction de la source, de la méthode de préparation et du degré de finesse [Hamada et al., 2020].

I.2.3. Facteurs influençant les caractéristiques des coquilles d'œufs :

a) Processus de broyage

Pour obtenir de la poudre de coquille d'œuf (PCO), les coquilles sont soumises à un processus de broyage et de tamisage. Ce processus influence considérablement les caractéristiques de l'PCO [Sathiparan, 2021]. Comme illustré dans la Figure I.5, au début de broyage, à mesure que la taille des particules diminue, la densité réelle et la surface spécifique (BET) augmentent [Baláz et al., 2015], [Tsai et al., 2008]. Cependant, après 30 minutes de broyage, la densité réelle se stabilise, tandis que la surface spécifique (BET) diminue légèrement au-delà de 50 minutes en raison de l'agglomération des particules et de la transformation de phase en aragonite. La taille des particules diminue rapidement au cours des 60 premières minutes, mais un broyage prolongé (jusqu'à 120 minutes) peut entraîner une légère augmentation due à l'agglomération des particules.



Graph I. 1 Influence du temps de broyage sur la densité réelle et la surface spécifique (BET) de l'PCO. (Source : [Baláz et al., 2015], [Tsai et al., 2008])

b) Température de calcination

Comme montre la Figure I.6, la couleur de l'PCO change en fonction de la température de calcination [Mohadi et al., 2016], [Cree et Pliya, 2019]. À 150°C la couleur reste blanche, à 300°C elle devient brun clair en raison de la combustion des matières organiques. En augmentant davantage la température, elle s'assombrit : gris clair à 450°C, gris foncé à 600°C et noir à 700°C. Cependant, entre 700°C et 1000°C, la poudre redevient blanche, ce qui indique la transformation de phase du CaCO_3 en CaO [Cree et Rutter, 2015].

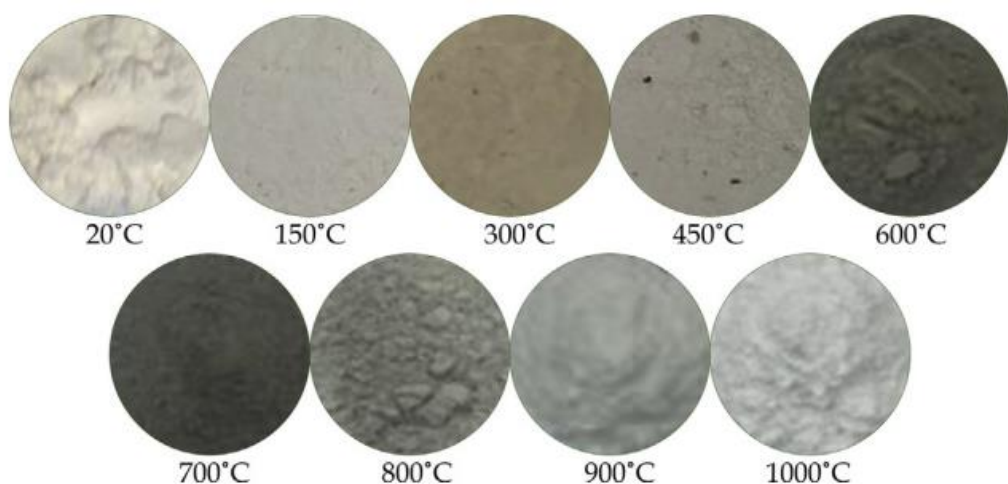


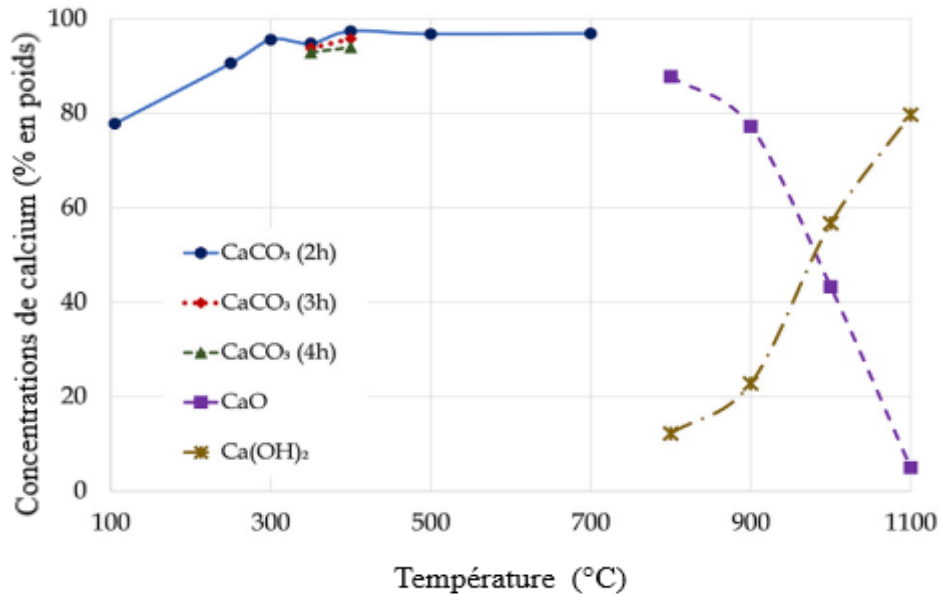
Figure I. 5 Variation de couleur de l'PCO en fonction de la température de calcination. (Source : [Mohadi et al., 2016], [Cree et Pliya, 2019])

Le processus de calcination de l'PCO comprend trois étapes distinctes de perte de masse ([Cree et Rutter, 2015],[Cree et Pliya, 2019],[Freire et Holanda, 2006], [Chraibi et al., 2016]) :

- En dessous de 700°C : Une perte de masse progressive (< 4%) due à l'évaporation de l'humidité et à la décomposition de la membrane organique.
- Entre 700°C et 900°C : Une chute brutale de masse (~40%) correspondant à la transformation de phase du CaCO_3 en CaO avec libération de CO_2 .
- Au-delà de 900°C : Une perte de masse stable de 45%, indiquant la décomposition thermique complète de l'PCO en CaO .

Le type de coquille d'œuf et la durée de calcination ont une influence minimale sur la perte de masse [Pliya et Cree, 2015].

La Figure I.7 montre les concentrations de calcium dans l'PCO à différentes températures de calcination [Cree et Rutter, 2015], [Zaman et al., 2018]. En dessous de 400°C, la concentration de CaCO_3 augmente de 80 % (à 105°C) à un maximum de 96–97 % (à 350–400°C), principalement en raison de l'évaporation de l'humidité et de la décomposition des membranes organiques. Une calcination de 2 heures est suffisante pour obtenir de la calcite pure [Brahimi et al., 2020]. À 800°C, le CaCO_3 se transforme en CaO , atteignant une concentration maximale de 87,8 %. Cependant, à des températures plus élevées (900–1100°C), la concentration de CaO diminue en raison de sa réaction avec la vapeur d'eau, formant du Ca(OH)_2 . La densité de l'PCO diminue avec l'augmentation de la température de calcination [Zaman et al., 2018].



Graph I. 2 Concentrations de calcium dans l'PCO en fonction de la température de calcination. (Source : [Cree et Rutter, 2015], [Zaman et al., 2018])

c) Processus de traitement

Cinq principales méthodes de traitement pour l'PCO à partir des coquilles d'œufs sont rapportées dans les études antérieures [Sathiparan, 2021] :

- Méthode 1 : Nettoyage, broyage, tamisage et séchage à l'air.
- Méthode 2 : Nettoyage, broyage, tamisage et séchage au four.
- Méthode 3 : Nettoyage, broyage, tamisage, séchage au four et calcination.
- Méthode 4 : Nettoyage, broyage, tamisage, séchage au four et blanchissement.
- Méthode 5: Nettoyage, broyage, tamisage, séchage au four, calcination et blanchissement.

La température de calcination varie de 400°C à 1000°C, et le processus de blanchissement comprend divers traitements, notamment NaOH, solution isophtalique, éthanol ou une combinaison des trois.

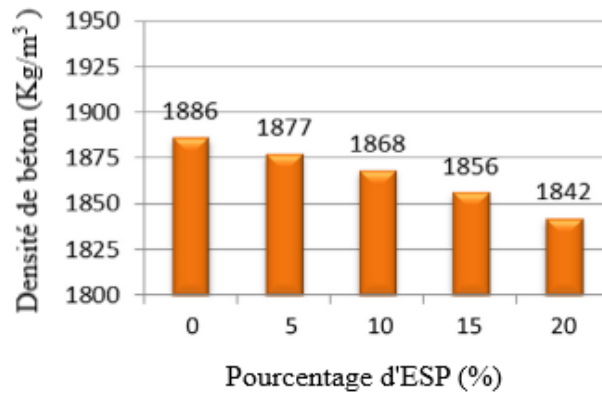
La concentration en calcium dans l'PCO varie selon chaque méthode de traitement. Après un nettoyage, broyage et tamisage, la concentration en calcium est d'environ 30 à 50 % [Yerramala, 2014]. Le séchage au four l'augmente à 62 % [Tan et al., 2018], et la calcination l'augmente à 77% [Ferraz et al., 2018]. La concentration en calcium la plus élevée, supérieure à 98 %, est obtenue grâce au blanchissement, qui purifie le calcium [Sathiparan, 2021].

I.3. Effet de la poudre de coquille d'œuf comme substituant partiel du ciment sur les propriétés du matériau cimentaire :

L'utilisation de l'PCO comme substituant partiel du ciment a fait l'objet d'un nombre limité de recherches [Beng We et al., 2020]. Les études disponibles varient considérablement en termes de formulation initiale : pourcentages de remplacement étudiés, nature de la poudre (calcinée ou non), et présence éventuelle d'autres matériaux de substitution (Fumée de silice, verre broyé..). Dans les paragraphes suivants, nous présentons et analysons les principaux résultats rapportés dans les études existantes, en mettant l'accent sur l'influence de l'PCO sur les caractéristiques mécaniques, physiques et sur la durabilité des matériaux cimentaires.

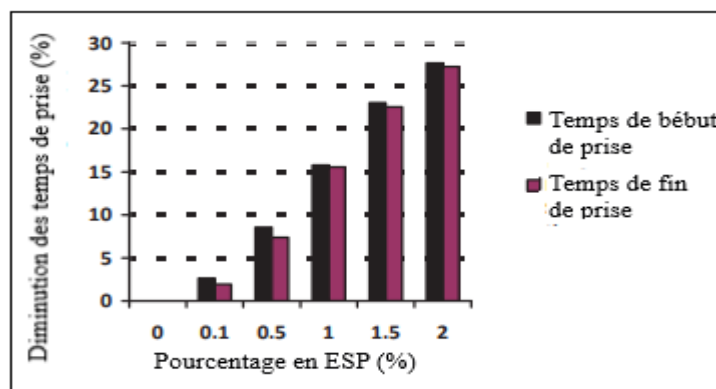
I.3.1. Propriétés à l'état frais du matériau cimentaire contenant de la poudre de coquille d'œuf :

Le Tableau I.2 montre que la densité relative des coquilles d'œuf est inférieure à celle du ciment. Par conséquent, le béton contenant de l'ESP présente nécessairement une densité plus faible que le béton témoin [Sathiparan, 2021]. Yerramala [Yerramala, 2014] a étudié les propriétés de béton incorporant l'PCO en remplacement partiel du ciment, avec des taux variant de 5 % à 15 %. Il a montré que l'augmentation du pourcentage d'PCO dans le béton entraîne la diminution de sa densité, en raison de la faible densité de l'PCO. Hama [Hama, 2017] a montré qu'une augmentation du pourcentage d'PCO dans le béton léger entraînait une diminution de la densité du béton, comme illustré dans la Figure I.8. Des résultats similaires sont constatés par Dhanalakshmet al. [Dhanalakshmet et al., 2015]. Mohamed et al. [Mohamad et al., 2018] ont étudié le remplacement de 10 % du ciment Portland ordinaire dans par différents pourcentages de cendre de palmier à huile et de poudre de coquille d'œuf (PCO) pour la confection de béton. Ils ont constaté que l'incorporation de 10 % d'PCO en substitution du ciment dans le béton entraîne une légère diminution de la densité du béton.



Graphe I. 3 Variation de la densité de béton en fonction de pourcentage de l'PCO. (Source : [Hama, 2017]).

Ujin et al. [Ujin et al., 2016] ont étudié l'effet du remplacement du ciment par 0,1 %, 0,5%, 1 %, 1,5 % et 2 % d'PCO sur les temps de prise du ciment. Comme montre la Figure I.9, ils ont constaté que l'PCO accélère le temps de prise initial et final, indiquant une réaction d'hydratation accélérée et un développement précoce de la résistance du ciment avec l'augmentation de pourcentage de l'PCO dans le mélange.



Graphe I. 4 Effet de l'PCO sur les temps de prise de la pâte de ciment. (Source : [Ujin et al., 2016])

Al-Safy [Al-Safy, 2015] a constaté que l'incorporation de jusqu'à 10% d'PCO dans le ciment n'entraînait aucune expansion volumique par rapport au ciment ordinaire.

Yerramala [Yerramala, 2014] a étudié l'ouvrabilité des bétons contenant l'PCO à l'aide de cône d'Abrams et a trouvé des valeurs d'affaissement particulièrement faibles, comprises entre 5 mm et 12 mm. Il a globalement constaté que les performances à l'état frais des bétons contenant de l'PCO étaient comparables à celles du béton témoin. Tan et al. [Tan et al., 2018] ont étudié le remplacement de 5 %, 10 %, 15 % et 20 % du ciment par de l'PCO pour la

production du béton. Ils ont constaté que les valeurs d'affaissement du béton contenant de l'PCO variaient entre $75 \text{ mm} \pm 25 \text{ mm}$, ce qui se situe dans la plage acceptable d'affaissement selon la formulation étudiée. Les résultats de ces études ont indiqué que l'PCO n'absorbe pas excessivement l'eau, ce qui permet de préserver l'ouvrabilité du mélange. Arif et al. [Arif et al., 2021] ont remarqué une diminution de l'affaissement de 50 mm pour le béton témoin à 45 mm pour le béton contenant 15% PCO. Dhanalakshmet al. [Dhanalakshmet et al., 2015] ont observé une ouvrabilité diminuée du béton incorporant 7.5% PCO et son augmentation avec l'augmentation du pourcentage de cendre volante. En revanche, Mohamed et al. [Mohamad et al., 2018] ont constaté que l'incorporation de 10 % d'PCO en substitution du ciment dans le béton entraîne l'augmentation de l'ouvrabilité par 7 % en comparaison au mélange témoin.

Zain et al. [Zain et al., 2021] ont étudié l'ouvrabilité du béton autoplaçant contenant 5 %, 10 % et 15 % de PCO (passant à $0,6 \mu\text{m}$) en remplacement partiel du ciment, en utilisant les essais d'étalement au cône d'Abrams et l'essai à la boîte en L (Tableau I.2). Leurs résultats ont montré une légère diminution de la fluidité et de la capacité de remplissage avec l'augmentation de pourcentage de l'PCO dans le mélange. De plus, ils ont observé qu'une teneur plus élevée en PCO présente un effet positif sur la cohésion du mélange et la ségrégation du béton.

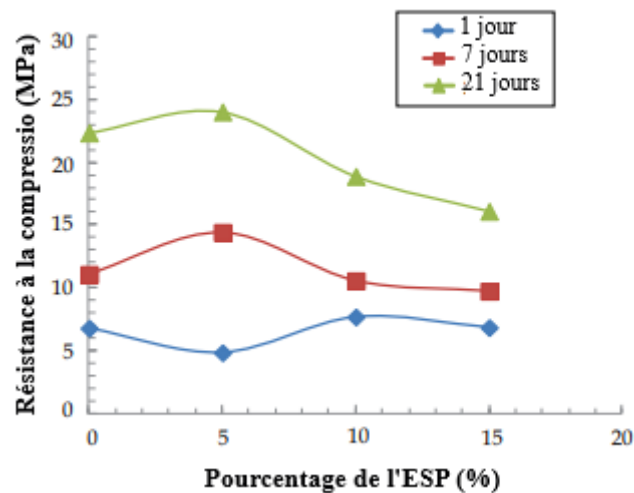
Tableau I. 3 Propriétés physiques des coquilles d'œufs.

Mélange (%ESP)	Étalement (mm)	Temps $T_{500, \text{mm}}$ (s)	Taux de remplissage, boîte en L
Témoin -0%	630	4	0.98
BAPE-5%	615	7	0.95
BAPE-10%	590	10	0.9
BAPE-15%	575	12	0.88

I.3.2. Propriétés à l'état durci du matériau cimentaire incorporant de la poudre de coquille d'œuf :

Parthasarathi et al. [Parthasarathi et al., 2017] ont mené une étude sur des mélanges de béton contenant différents pourcentages de fumée de silice et l'PCO . Leurs résultats montrent que la substitution du ciment par de l'PCO , jusqu'à un taux de 15 %, améliore la résistance à la compression, indépendamment de l'effet de la fumée de silice. Yerramala [Yerramala, 2014] a constaté que l'incorporation de 5 % d'PCO en remplacement partiel du ciment améliore la résistance à la compression par rapport à l'échantillon témoin, suggérant que ce

pourcentage est optimal pour améliorer les performances du béton (Figure I.10). Cependant, une augmentation du taux de remplacement de l'PCO au-delà de 5 % a généralement entraîné une diminution de la résistance à la compression. Ces résultats sont en accord avec ceux de Beng We et al. [Beng We et al., 2020], qui ont mené une étude similaire en remplaçant le ciment par de l'PCO très fine (moins de 340 nm). Ils ont conclu que l'PCO utilisée à faibles pourcentages (2.5% et 5%) améliore la résistance grâce à son effet de remplissage et à sa teneur élevée en calcium, favorisant ainsi l'hydratation. Cependant, à des taux de substitution plus élevés (7.5% et 10%), elle entraîne une augmentation de la demande en eau, ce qui augmente le volume des pores et, et par conséquent résulte par une résistance réduite de béton [Beng We et al., 2020].

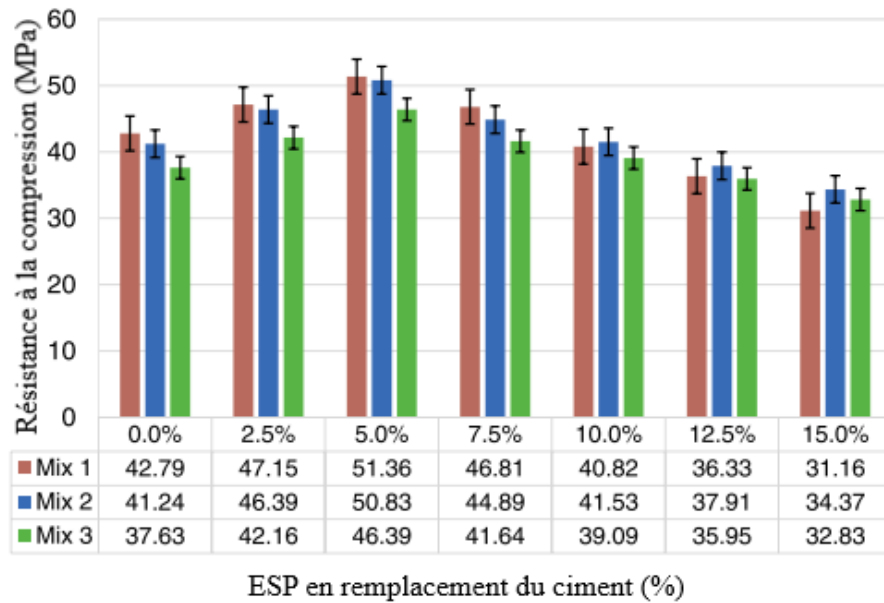


Graphe I. 5 Variation de la résistance à la compression de béton en fonction de la teneur en PCO (Source : [Yerramala, 2014])

Abdulabbas [Abdulabbas, 2016] a préparé des mortiers en remplaçant partiellement de ciment par 0 %, 5 %, 7,5 % et 10 % de l'PCO . Les résultats ont montré une augmentation de la résistance à la compression à 28 jours des mortiers contenant 5 % et 7,5 % d'PCO par 10 % et 8 %, respectivement. En revanche, un remplacement de 10 % d'PCO a entraîné une diminution de 23 % de la résistance à la compression par rapport au mortier témoin. Au même âge, Tan et al. [Tan et al., 2018] ont trouvé que le mélange offrant la meilleure résistance à la compression de béton est celui contenant 15 % d'PCO . Ils ont également remarqué que le béton contenant jusqu'à 20 % d'PCO présente une résistance à la compression précoce plus élevée que celle du béton témoin. Pliya et Cree [Pliya et Cree, 2015] ont investigué des mortiers contenant de différents pourcentages (5 %, 10 %, 15 % et 20 %) de l'PCO blanche

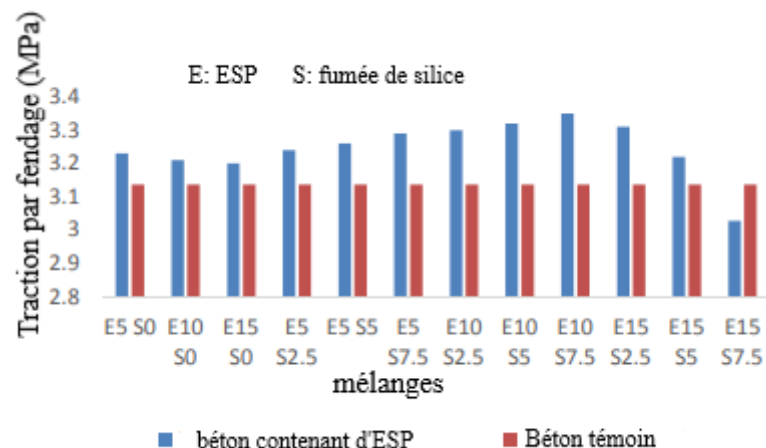
et brune en remplacement partiel du ciment Portland. Les résultats ont montré que la résistance à la compression diminue pour tous les pourcentages de remplacement par rapport aux mortiers témoins. Par exemple, pour le mortier contenant 5 % de l'PCO blanche ou brune, la résistance à la compression a diminué par 14 % par rapport à celle du témoin. Des résultats similaires ont été trouvés par Cree et Pliya [Cree et Pliya, 2019], qui ont étudié l'effet des températures élevées sur la résistance des mortiers contenant de l'PCO. Ils ont également rapporté que les mortiers contenant de l'PCO présentent une perte de résistance plus importante à haute température. Al-Safy [Al-Safy, 2015] a observé une diminution de la résistance à la compression à long terme (56, 70 et 90 jours) lorsque l'ESP était utilisée en remplacement partiel du ciment dans le mortier et que la diminution la plus marquée étant enregistrée pour le mortier contenant 10 % d'PCO.

Alsharari et al. [Alsharari et al., 2022] ont étudié l'effet du remplacement du sable et du ciment par différents pourcentages de PCO (0–15 %), calcinée à 900 °C pendant trois heures, sur la résistance à la compression des mortiers. Comme montré sur la Figure I.11, les résultats ont montré que, par rapport à l'échantillon de référence sans PCO, la résistance à la compression du mortier (contenant 15 % de fumée de silice) a augmenté d'environ 10.4 %, 20.3 % et 9.6 % lorsque le taux de remplacement l'PCO était 2,5 %, 5 % et 7.5 %, respectivement. Cependant, à des concentrations plus élevées d'PCO, la résistance a diminué par rapport au mortier témoin. Ils ont constaté que la résistance à la compression max était atteinte pour un pourcentage de remplacement de 5 % d'PCO, entraînant une augmentation de 23,3 % par rapport à l'échantillon témoin dans le mélange contenant 15 % de fumée de silice. Jaber et al. [Jaber et al., 2020] ont mené une étude sur le remplacement du ciment par (1) de l'PCO non traitée, obtenue après le processus de broyage, et (2) de l'PCO traitée (TESP), obtenue après calcination de l'PCO à 750°C pendant 1 heure, afin d'évaluer ses effets sur les propriétés du mortier. Les résultats montrent que la résistance à la compression de tous les mortiers (contenant 5%, 10%, 15% et 20%) a augmenté avec l'ajout de l'PCO traitée et non traitée UPCO. De plus, l'PCO traitée développe des résistances supérieures à celles des mortiers avec l'PCO non traitée pour le même taux de remplacement.



Graph I. 6 Résistance à la compression de mortier incorporant différents pourcentages d'PCO (Source : [Alsharari et al., 2022])

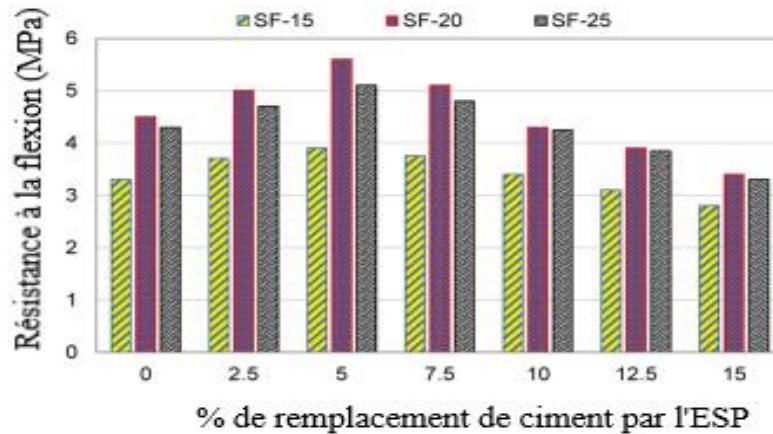
Les résultats de Parthasarathi et al. [Parthasarathi et al., 2017] ont montré que la résistance à la traction par fendage du béton incorporant l'PCO diminue avec l'augmentation de pourcentage d'PCO, comme illustré à la Figure I.12. Yerramala [Yerramala, 2014] a observé que la résistance à la traction par fendage du béton incorporant de l'PCO restait comparable à celle de témoin pour des taux de remplacement allant jusqu'à 10 %. Cependant, lorsque la teneur en PCO atteignait 15 %, elle diminue, indiquant qu'à des niveaux de substitution plus élevés, l'PCO peut avoir un impact négatif sur les performances en traction du béton.



Graph I. 7 Résistance à la traction par fendage de béton incorporant différents pourcentages d'PCO (Source : [Parthasarathi et al., 2017])

[Beng We *et al.*, 2020] a observé qu'un remplacement du ciment par 5 % d'PCO améliore la résistance à la flexion. Cependant, le dépassement de ce pourcentage a généralement entraîné une diminution de la résistance à la flexion. Tan et al. [Tan *et al.*, 2018] ont constaté que le béton contenant de l'PCO présentait une résistance à la flexion supérieure à celle du mélange témoin et que 15 % PCO présente avec une augmentation d'environ 58 % par rapport au mélange témoin. À un taux de remplacement de 20 %, la résistance à la flexion a légèrement diminué, mais reste supérieure de 6,3 % à celle du témoin. Les résultats de Parthasarathi et al. [Parthasarathi *et al.*, 2017] montrent aussi que la substitution du ciment par de l'PCO, jusqu'à un taux de 15 %, augmente la résistance à la flexion. En revanche, Les résultats de Pliya et Cree [Pliya et Cree, 2015] ont montré que l'ajout de l'PCO blanche et brune dans le mortier a entraîné une diminution de la résistance à la et à la flexion à tous les pourcentages de remplacement du ciment Portland. Hama [Hama, 2017] ont aussi signalé une diminution de de la résistance à la flexion du béton léger avec l'augmentation de pourcentage d'PCO et que l'PCO à 5 % a permis d'obtenir une résistance à la flexion similaire à celle du mélange témoin.

Amin et al. [Amin *et al.*, 2023] ont étudié l'effet du remplacement du sable et du ciment par différents pourcentages de PCO (0–15 %), calcinée à 900 °C pendant trois heures, sur la résistance à la flexion des mortiers. Comme montré sur la Figure I.13, les résultats ont montré que, par rapport à l'échantillon de référence sans PCO , la résistance à la flexion du mortier (contenant 15 % de fumée de silice) a augmenté d'environ 12,1 %, 18,2 %, 13,6 % et 3 % lorsque le taux de remplacement l'PCO était 2,5 %, 5 %, 7,5 % et 10 %, respectivement. Cependant, à des concentrations plus élevées d'PCO, la résistance a diminué par rapport à l'échantillon de référence. Ils ont constaté que la résistance à la flexion maximale est obtenue avec le mélange contenant 5 % d'PCO, entraînant une augmentation de 24,4 % par rapport au mélange témoin.

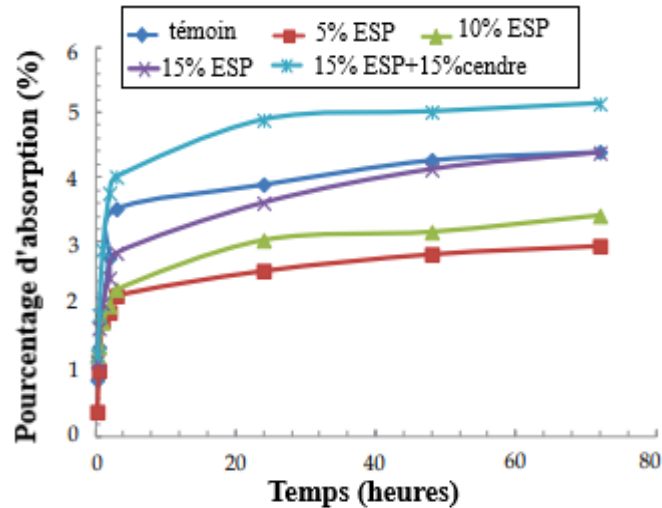


Graphe I. 8 . Résistance à la flexion de mortier incorporant différents pourcentages d'PCO

(Source : [Amin et al., 2023])

I.3.3. Durabilité du matériau cimentaire contenant de la poudre de coquille d'œuf :

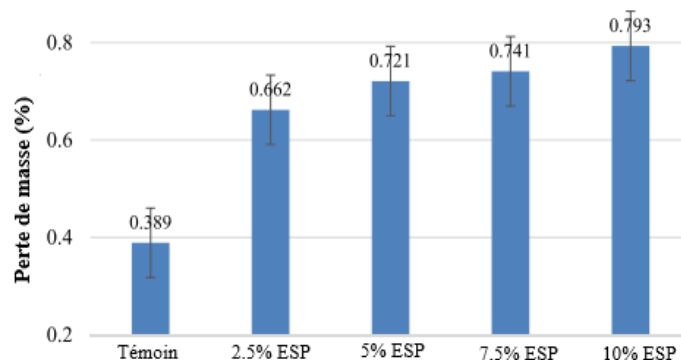
Comme l'illustre la Figure I.14, les résultats de Yerramala [Yerramala, 2014] montrent que l'absorption d'eau des bétons contenant respectivement 5% et 10% d'PCO en remplacement du ciment est inférieure à celle du béton témoin. En revanche, le béton incorporant 15% PCO, présente une absorption similaire à celle du béton témoin. Tan et al. [Tan et al., 2018] constaté que la perméabilité du béton contenant de l'PCO était considérablement réduite (jusqu'à 75 %) pour toutes les concentrations testées (5% à 20%), et la cela indique que l'PCO pourrait être un bon filler pour le béton. Beng We et al [Beng We et al., 2020] ont constaté qu'une augmentation du pourcentage de remplacement du ciment par de l'PCO très fine (moins de 340 nm) entraîne la réduction de l'absorption d'eau de mortier. Les mêmes résultats sont signalés par Jaber et al. [Jaber et al., 2020] avec les mortiers contenant l'PCO traitée et non traitée. Cela peut s'expliquer par les fines particules de l'PCO qui remplissent les pores du mélange de mortier, réduisant ainsi leur taille et entraînent la diminution de l'absorption d'eau ainsi que de la conductivité thermique du mortier. Les mêmes résultats sur l'absorption d'eau sont signalés par Doh et Choo [Ing et Choo, 2014]. Hama [Hama, 2017] a montré que l'absorption d'eau augmente avec l'augmentation de l'PCO dans le mélange du béton léger.



Graph I. 9 Variation de pourcentage d'absorption des bétons contenant différents pourcentages d'PCO (Source : [Yerramala, 2014])

Abdulabbas [Abdulabbas, 2016] a constaté que l'ajout d'une faible proportion de l'PCO (5 % et 7,5 %) au mélange augmente à la fois le retrait de séchage et la résistance à la compression, néanmoins lorsque la teneur en PCO atteignait 10 %, une diminution du retrait de séchage et de la résistance à la compression a été constatée.

Beng We et al [Beng We et al., 2020] ont constaté que le mortier contenant de l'PCO est plus vulnérable à l'attaque acide, ce qui peut être expliqué par la formation d'une teneur en hydroxyde de calcium généralement plus élevée que celle formée dans le mortier témoin (Figure I.15). Tan et al. [Tan et al., 2018] ont constaté que la résistance du béton contre l'attaque acide diminue à mesure que le pourcentage d'PCO augmente dans le mélange et que le béton contenant 20 % PCO présente une réduction significative de la durabilité.



Graph I. 10 Perte de masse sous l'attaque d'acide (Source : [Beng We et al., 2020])

Conclusion :

L'utilisation de la poudre de coquille d'œuf (PCO) comme substitut partiel du ciment présente un intérêt croissant en raison de sa composition chimique riche en carbonate de calcium, de sa légèreté et de sa disponibilité. De nombreuses études ont exploré ses applications dans divers matériaux cimentaires, démontrant des résultats globalement positifs, notamment pour de faibles pourcentages de substitution. Au-delà de ces seuils, cependant, une diminution des performances mécaniques, notamment de la résistance à la compression, est généralement observée.

Toutefois, des recherches complémentaires s'avèrent nécessaires afin de mieux comprendre les mécanismes de réaction, d'optimiser les formulations, et d'assurer la performance de ce matériau à long terme.

La valorisation des coquilles d'œuf dans les matériaux de construction contribue également à la réduction des impacts environnementaux liés à la consommation excessive de ciment.

Chapitre II.

Matériaux et Procédures expérimentales

Chapitre II : Matériaux et Procédures expérimentales

Introduction

La qualité des matériaux cimentaires dépend étroitement de la nature et de la qualité des constituants entrant dans leur formulation. Ainsi, une évaluation rigoureuse des propriétés des matériaux avant leur incorporation, ainsi qu'un choix approprié des éléments du mélange, sont essentiels pour assurer la durabilité et les performances souhaitées du matériau.

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

II.1. Caractérisation des matériaux utilisés :

II.1.1. Sable

Dans tous les mélanges de notre étude, le sable utilisé est un sable naturel provenant de la vallée d'Oued M'zi de la wilaya de Laghouat (Photo II.1).



Photo II . 1 Sable utilisé. (Source : Auteurs)

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

a) Analyse granulométrique :

L'étude granulométrique du sable constitue une étape essentielle pour obtenir une compacité optimale du mortier, en raison de son influence directe sur les propriétés à l'état frais et durci. Pour cela, une analyse granulométrique du sable utilisé dans cette étude a été réalisée (Photo

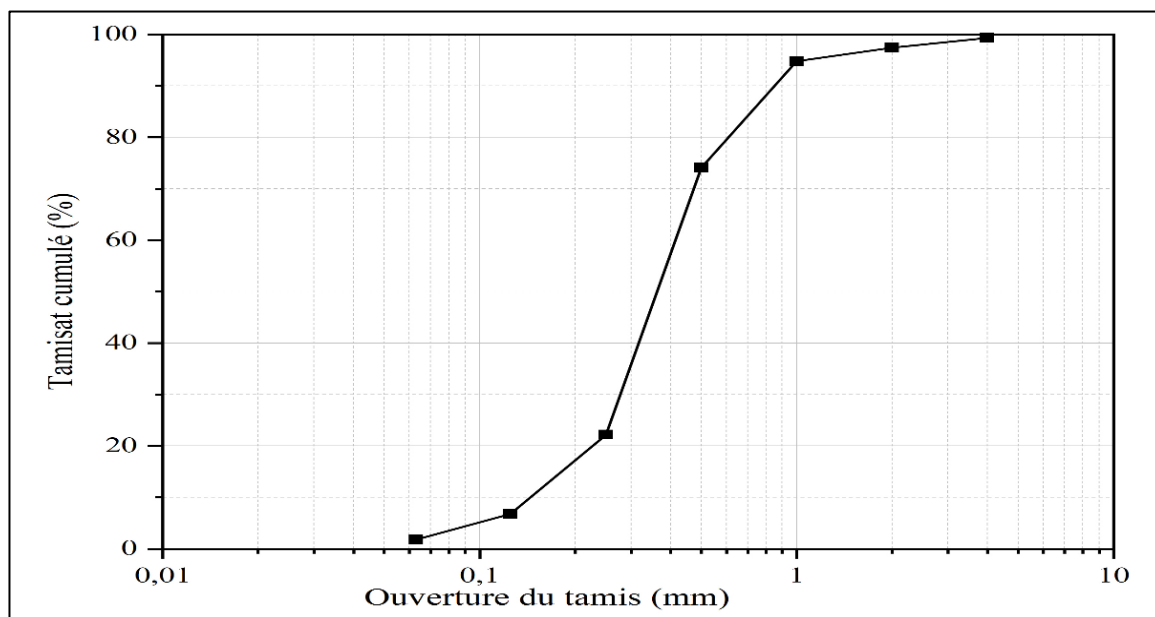
II.2) conformément à la norme européenne [NF EN 933-1, 2012]. Les résultats obtenus sont présentés dans les Tableau II.1. Les pourcentages de passant cumulé de sable sont représentés sous forme de courbes granulométriques dans la Figure II.1.



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

Tableau II. 1 Analyse granulométrique de sable. (Source : Auteurs)

Tamis (mm)	Refus Partiel (g)	Refus cumulé (g)	Pourcentage Refus	Pourcentage passant
4	6,3	6,3	0,671	99,329
2	17,9	24,2	2,579	97,421
1	24,7	48,9	5,212	94,788
0,5	194,2	243,1	25,914	74,086
0,25	487,2	730,3	77,848	22,152
0,125	144,1	874,4	93,209	6,79
0,063	46,7	921,1	98,187	1,813
Coefficient d'uniformité (Cu) = $\frac{d_{60}}{d_{10}}$		2.9		
Module de finesse		2,05		



Graphe II. 1 Analyse granulométrique de sable. (Source : Auteurs)

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

b) Masses volumiques :

Les masses volumiques des granulats constituent un paramètre essentiel pour évaluer la densité intrinsèque des matériaux ainsi que leur porosité. Pour cela, nous avons mesuré les masses volumiques apparentes (Photo II.3) et absolues (Photo II.4) pour notre sable selon les normes [NF EN 1097-3, 1998] et [NF EN 1097-6, 2014], respectivement. Les masses volumiques calculées sont présentées dans le Tableau II.2.



Photo II . 3 Masse volumique apparente de sable. (Source : Auteurs)



Photo II . 4 Masse volumique absolue de sable. (Source : Auteurs)

Tableau II. 2 Résultats des masses volumiques de sable. (Source : Auteurs)

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

c) Propreté de sable :

La propreté des granulats doit être toujours vérifiée, car l'utilisation des granulats non propres avec des impuretés argileuses peut affecter négativement les propriétés mécaniques et la durabilité de matériau cimentaire. Dans la présente étude, la propreté de sable est vérifiée en utilisant l'essai d'équivalent de sable selon la norme [NF EN 933-8, 2012] (Photo II.5) et l'essai au bleu de méthylène selon la norme [NF EN 933-9, 2022] (Photo II.6). Les résultats de l'essai sont présentés dans le Tableau II.3.



Photo II . 5 Essai équivalent de sable. (Source : Auteurs)

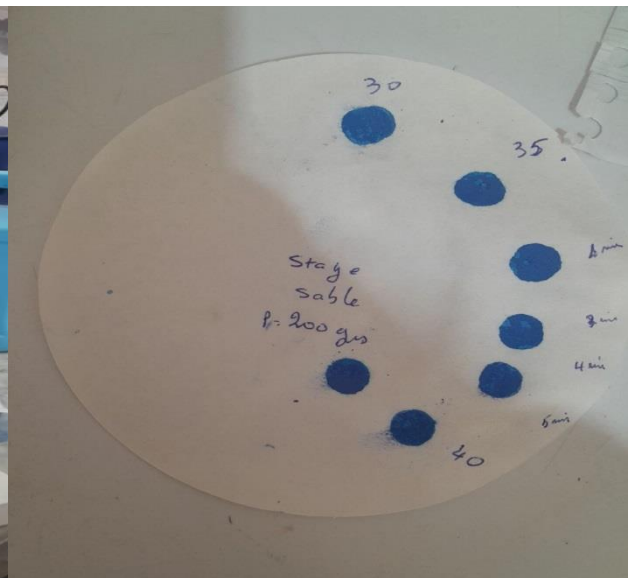


Photo II . 6 Essai au bleu de méthylène. (Source : Auteurs)

Tableau II. 3 Résultats des essais de propreté. (Sources : Auteurs)

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

Les résultats de Tableau II.3 montrent que le sable utilisé dans cette étude a un ES légèrement inférieure à 60% valeur recommandée par la norme [NF EN 18-540, 1997] pour un béton de qualité. La valeur de bleu pour le sable utilisé dans notre étude est : $MB = 0,05 < 1$ valeur maximale exceptée par la norme [NF EN 18-540, 1997].

d) Caractéristiques chimiques des granulats :

Le sable utilisé dans cette étude est soumis à une analyse chimique selon les méthodes normalisées et les résultats obtenus sont présentés dans le Tableau II.4.

Tableau II. 4 Analyses chimiques de sable. (Source : Auteurs)

Propriétés mesurées/Norme	Sable
Insolubles (%) NFP 15-461	91
Carbonates (% CaCO_3) NFP15-461	03
Chlorures : % Cl^-	0.003
NaCl	0.006

II.1.2. Ciment et ajouts minéraux

II.1.2.1. Ciment

Le ciment utilisé dans notre étude est le ciment Matine CEM II/B-L 42,5 N (Photo II.7). Le ciment est conforme à la norme algérienne [NA442, 2013] et Européenne [EN 197-1, 2006]. Les caractéristiques chimiques du ciment sont présentées dans le Tableau II.5.

Tableau II. 5 Caractéristiques chimiques et minéralogiques du ciment. (Source : [LAFARGE, 2025])

Caractéristique	Valeur
Perte au feu (%) (NA5042)	10.0 ± 2
Teneur en sulfates (SO_3) (%)	2.5 ± 0.5
Teneur en oxyde de magnésium MgO (%)	Max 5%
Teneur en chlorures (NA5042) (%)	< 0.1
C_3S (%)	60 ± 3
C_3A (%)	7.5 ± 1



Photo II . 7 Ciment utilisé. (Source : Auteurs)

II.1.2.2. Poudre des coquilles d'œufs (PCO)

Des coquilles d'œufs brunes et blanches, issues de déchets ménagers, ont été collectées et soigneusement lavées afin d'éliminer toute impureté. La membrane interne (pellicule blanche) a également été retirée. Les coquilles ont ensuite été séchées dans l'étuve pendant 24 heures à une température de 105 °C.

La poudre des coquilles d'œufs est ensuite préparée selon les étapes suivantes

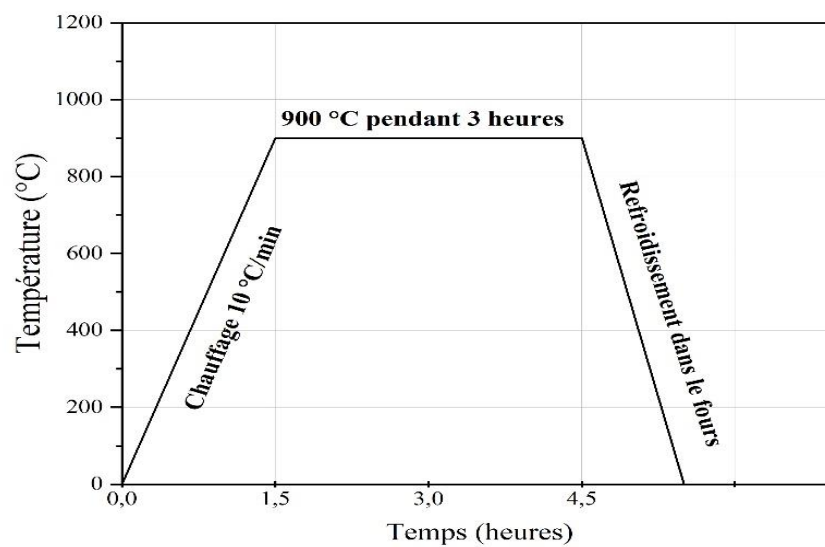
(Photo II.8):

- **Broyage et tamisage** : le brouillage des coquilles d'œufs est effectué à l'aide d'une machine Micro-Deval, puis la poudre obtenue est tamisée à l'aide d'un tamis de maille 160 µm pour obtenir une poudre homogène.
- **Calcination** : la poudre obtenue est ensuite calcinée dans un four électrique à une température de 900 °C pendant 3 heures à fin d'obtenir une poudre contient de de la nano-CaO selon l'équation suivante : $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$ (II.1)
- La calcination a été effectuée par lots de 100g. La température de calcination a été atteinte à partir de la température ambiante, avec une vitesse d'augmentation de 10 °C par minute jusqu'à 900 °C, comme illustré sur la Figure II.2. Le refroidissement s'est effectué à l'intérieur du four jusqu'à ce que la température diminue naturellement, afin d'éviter tout choc thermique susceptible d'altérer les propriétés du matériau.

Après la calcination, la PCO est stockée dans un récipient en plastique fermé afin d'éviter toute absorption d'humidité ou réaction avec l'air ambiant.



Figure II. 1 Étapes de préparation de poudre de coquilles calcinée. (Source : Auteurs)



Graphe II. 2 Procédure de calcination. (Source : Auteurs)

II.1.2.3. Fumée de silice (FS)

La fumée de silice est un ajout pouzzolanique largement reconnu pour ses effets bénéfiques sur les propriétés mécaniques et la durabilité du béton. Grâce à sa fine granulométrie et à sa forte réactivité, la fumée de silice réagit avec l'hydroxyde de calcium Ca(OH)_2 libéré lors de l'hydratation du ciment ou CaO , formant ainsi un silicate de calcium hydraté (C-S-H) supplémentaire, processus connu sous le nom de réaction pouzzolanique [Parthasarathi *et al.*, 2017].

Dans cette étude, une fumée de silice (FS) fournie par TeknaChem (Photo II.9) est utilisée en combinaison avec la poudre de coquilles d'œufs (PCO) afin de compenser la baisse de performance éventuelle liée à l'utilisation de cette dernière et d'améliorer globalement la résistance et la durabilité du mortier. Les caractéristiques chimiques du fumé de silice sont présentées dans le Tableau II.6.

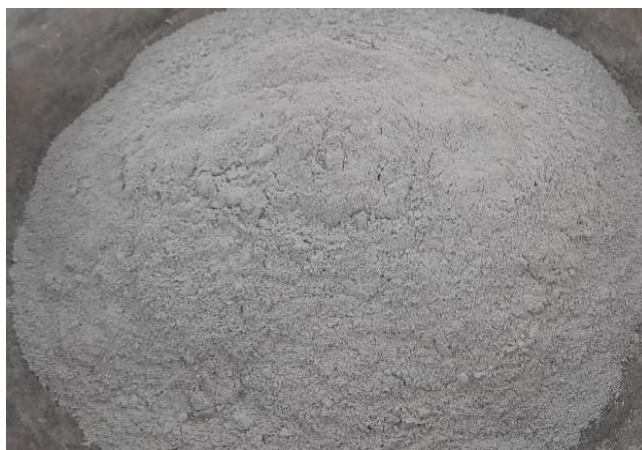


Photo II . 8 Fumée de silice. (Source : Auteurs)

Tableau II. 6 Caractéristiques chimiques de la fumée de silice. (Source : [TeknaChem, 2025])

Composition chimique	Valeur (%)
SiO_2	> 95
CaO	< 0.5
MgO	< 1
Fe_2O_3	< 1
Al_2O_3	< 0.5
Autres composants	des traces

II.1.2.4. Analyses des composants cimentaires utilisées

- **Caractéristiques chimiques**

Dans cette étude, une perte de masse d'environ 45 % a été observée après calcination à 900°C de la PCO et la poudre a pris une couleur blanche (Photo II.10), ce qui montre que totalité de la poudre calcinée (PCO) est transformée en CaO [Sathiparan, 2021]. La calcination entraîne aussi l'augmentation de la surface spécifique, permettant la formation de nano-CaO [Hamada *et al.*, 2020], ce qui améliore considérablement sa réactivité chimique. Il a été trouvé qu'après calcination, la concentration en oxyde de calcium (CaO) dans la poudre de coquilles d'œufs peut atteindre environ 80 % [Amin *et al.*, 2023], tandis que la teneur en oxyde de silicium (SiO₂) restait très faible. Pour cela, la PCO calcinée ne peut pas être considérée comme un matériau pouzzolanique, mais il peut réagir efficacement lorsqu'il est combiné avec des matériaux pouzzolaniques.

Pour cela, un mélange contenant 5% de la fumée de silice combinée avec le pourcentage de PCO qui montré les meilleures performances mécaniques a également été examiné. Cette fumée de silice est constituée de 93 à 98 % de particules sphériques de dioxyde de silicium (SiO₂) (Tableau II.6), ce qui lui confère une très grande finesse et une forte réactivité pouzzolanique.



Photo II . 9 Poudre de coquilles d'œufs après calcination. (Source : Auteurs)

▪ Caractéristiques physiques

Afin de comparer les masses volumiques apparentes et absolues du ciment et des ajouts minéraux, des essais ont été réalisés conformément aux normes [NF EN 1097-3, 1998] et [NF EN 1097-7, 1999], respectivement (Photo II.11). Les résultats des masses volumiques calculées sont présentés dans le Tableau II.7. À partir des résultats, on peut remarquer que les masses volumiques des ajouts sont inférieures à celle du ciment, ce qui agit positivement sur la densité globale du mélange et va permettre d'obtenir un mortier plus léger.



Photo II . 10 Mesure des masses volumiques absolues. (Source : Auteurs)

Tableau II. 7 Masses volumiques des matériaux cimentaires. (Source : Auteurs)

Propriétés	Ciment	PCO	FS
Couleur	gris	blanc	argent
Masse volumique apparente ρ_{app} (g/cm ³)	1.08	0.47	0.36
Masse volumique absolue ρ_{abs} (g/cm ³)	2.92	2.87	2.2

D'autre part, la finesse Blaine rapportée est estimée entre 3700 et 5200 cm²/g pour le ciment [LAFARGE, 2025], 3070 à 9550 cm²/g pour la poudre de coquilles d'œufs [Sathiparan, 2021], et atteint environ 220 000 cm²/g [TeknaChem, 2025] pour la fumée de silice. Grâce à leur finesse, en particulier celle très élevée de la fumée de silice, ces ajouts agissent comme des fillers en comblant les vides du mélange, ce qui va améliorer la compacité du mortier. Grâce à sa couleur blanche, la PCO calcinée peut même être utilisée en substitution partielle du ciment blanc.

II.1.3. Eau de gâchage :

L'eau de gâchage utilisée ne doit pas contenir d'excès de substances susceptibles d'influencer la réaction d'hydratation et altérer la qualité finale du mortier. Pour cela, l'eau utilisée pour les essais de notre étude est l'eau distillée .

II.2. Étude de l'influence de la poudre des coquilles d'œufs sur l'hydratation et la stabilité du volume du ciment:

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

Dans cette étude nous avons testé des pâtes de ciment hydratées avec 3, 6, et 9 % de PCO, ainsi qu'un mix de 3 % de PCO et 5 % de fumée de silice (FS), exprimés en pourcentage du poids de ciment. Les concentrations sont préparées en mélangeant préalablement la quantité de matériau requise avec le ciment. Le pourcentage d'eau utilisé dans tous les mélanges a été déterminé à l'avance en réalisant l'essai de consistance sur le mélange témoin (sans ajouts). Cette même quantité d'eau a ensuite été fixée pour tous les mélanges contenant des ajouts, afin de garantir des conditions de comparaison homogènes.



Photo II . 11 Essai de prise de ciment.



Photo II . 12 Essai de la stabilité de volume du ciment.

II.3. Étude de l'influence de la poudre des coquilles d'œufs sur la résistance mécanique du mortier :

II.3.1. Formulation et Confection des éprouvettes :

Dans notre étude nous avons préparé des éprouvettes de mortier en utilisant les formulations présentées dans le Tableau II.8. Le mortier de référence est préparé avec l'eau distillée et le ciment sans ajouts minéraux. Quatre types de mortiers : trois contenant 3%, 6% et 9% de la PCO et un contenant 3% PCO et 5% fumée de silice, en poids du ciment. Les ajouts ont été préalablement mélangés avec le ciment. Les éprouvettes confectionnées sont de dimensions $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$, confectionnées selon la norme [EN 196-1, 2016] et [IS :4031 (part 6), 2005] (Photo II.14). Les éprouvettes ont été démoulées 24 heures après le coulage, puis placées dans une chambre humide à $20 \pm 2^\circ\text{C}$ avec une humidité relative $\geq 95\%$ jusqu'au jour de l'essai, afin d'assurer un durcissement optimal.

Tableau II.8. Mélanges des mortiers étudiés. (Source : Auteurs)

Matériaux	Témoin	3% PCO	6% PCO	9% PCO	3% PCO +5%FS
Sable (g)	1350				
Ciment (g)	450	436.5	423	409.5	414
Eau (g)	247.5				
PDC (g)	0	13.5	27	40.5	13.5
FS (g)	0	0	0	0	22.5



Photo II . 13 Confection des éprouvettes de mortier. (Source : Auteurs)

II.3.2. Résistance mécanique du mortier

La résistance à la traction par flexion des mortiers a été évaluée à l'aide d'essais de flexion à 3 points réalisés selon la norme [EN 196-1, 2016]. Pour chaque concentration et temps, trois éprouvettes ont d'abord été rompues par flexion, puis les six demi-prismes obtenus ont été soumis à la compression (Photo II.15).



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

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

$$\text{*Résistance à la traction par flexion (MPa) : } \sigma_t = \frac{1.5 F_f L}{b^3} \quad (\text{II.2})$$

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

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

$$\text{*Résistance à la compression (MPa) : } \sigma_c = \frac{F_c}{S} = \frac{F_c}{b^2} \quad (\text{II.3})$$

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

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

II.4. Étude de l'influence de la poudre des coquilles d'œufs sur la durabilité du mortier:

II.4.1. Absorption capillaire

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

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

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

$$C_{at} = \frac{M_j - M_0}{S} \quad (\text{II.5})$$

Avec

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

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

S : section de la base de l'éprouvette (m²).

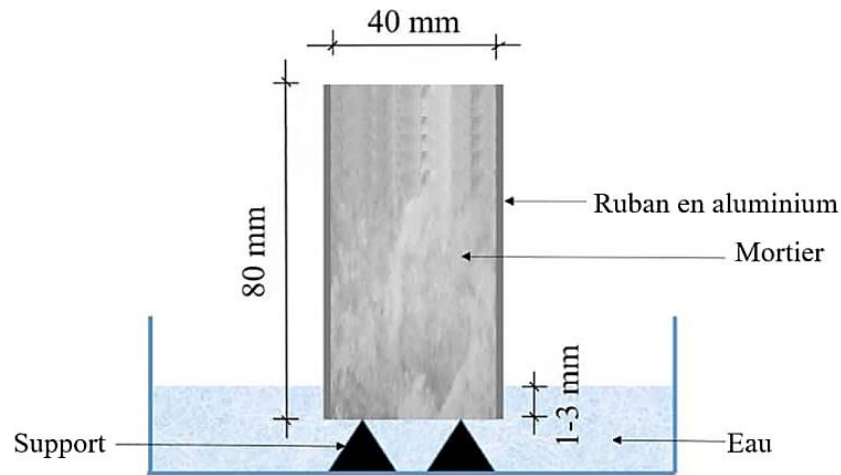


Figure II. 2 Essai d'absorption capillaire. (Source : Auteurs)

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

$$C_a = \frac{C_{a4} - C_{a1}}{\sqrt{4} - \sqrt{1}} \quad (\text{II.6})$$

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

II.4.2. Résistance à l'attaque acide

Après leur cure dans l'eau au sein de la chambre humide pendant 28 jours, le poids initial des éprouvettes de mortier (4×4×8 cm³) a été mesuré et enregistré avant leur immersion dans une solution acide diluée. Une solution d'acide sulfurique (H₂SO₄) à 5 % de concentration a été préparée en laboratoire. Les éprouvettes sont ensuite émergées dans la solution (Photo II.16) et tout changement poids a été mesuré tous les 14 jours jusqu'à atteindre une durée totale de **28 jours**. La valeur du pH de la solution d'acide sulfurique a été maintenue à pH 1. Le pH de la solution a été renouvelé chaque 14 jours afin de le garder constant.

La résistance des échantillons aux agressions chimiques causées par l'immersion dans la solution a été évaluée conformément à la norme [ASTM C 267-96, 2006]. Après immersion, les éprouvettes sont nettoyées avec de l'eau afin d'éliminer le mortier altéré .



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

Conclusion :

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

Chapitre III.

Résultats et interprétations

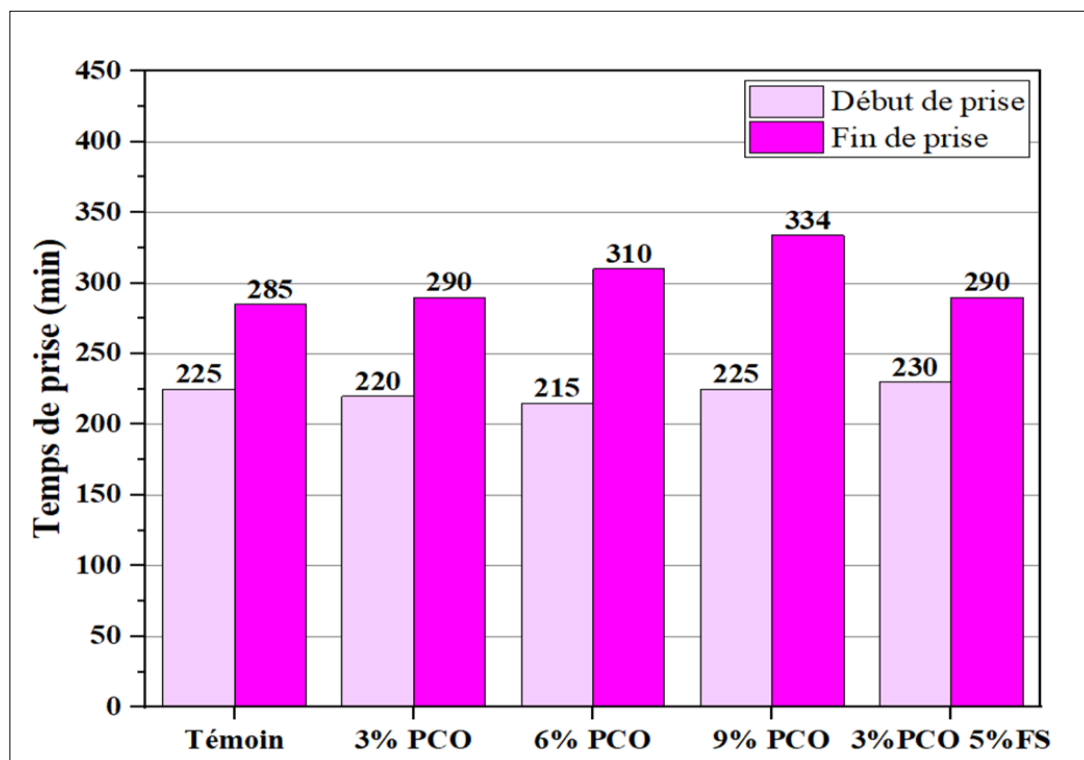
Chapitre III : Résultats et interprétations

Introduction :

Ce chapitre présente et analyse les résultats expérimentaux obtenus sur des mortiers, en mettant en évidence l'impact du remplacement partiel du ciment par de la poudre de coquilles d'œufs (PCO) et l'ajout de fumée de silice sur diverses propriétés telles que les temps de prise, la densité, les résistances mécaniques et la durabilité en milieu agressif, afin d'évaluer l'efficacité de ces matériaux alternatifs sur les performances globales du mortier.

III.1. Étude de l'effet de la poudre de coquilles d'œufs sur l'hydratation et la stabilité du volume du ciment :

L'effet de la poudre de coquilles d'œufs (PCO) sur le processus d'hydratation du ciment a été étudié en réalisant des essais de prise sur des pâtes contenant différentes proportions de coquilles d'œufs (3, 6, et 9 % PCO) ainsi qu'une pâte contenant 3 % de PCO et 5 % de fumée de silice (FS). Les résultats obtenus sont présentés dans Figure III.1 et le Tableau III.1.



Graphe III. 1 Variation des temps de prises en fonction du pourcentage de la poudre de coquilles d'œufs (PCO). (Source : Auteurs)

Tableau III. 1 Effet de la poudre de coquilles d’œufs (PCO) sur l’hydratation et la stabilité du volume du ciment. (Source : Auteurs)

Mélange	Rapport E/C	Début de prise (min)	Fin de prise (min)	Pénétration de la sonde (mm)	Expansion (mm)
Témoin	0.29	225	285	6	2
3% PCO		220	290	10	/
6% PCO		215	310	14	/
9% PCO		225	334	16	2
3% PCO+ 5% FS+		230	290	20	/

L’analyse des résultats présentés dans la Figure III.1 et le Tableau III.1 montre que l’augmentation du pourcentage de la PCO influence légèrement le temps de début de prise. En comparaison avec le mélange témoin, les pâtes de ciment contenant 3% et 6 % de PCO présentent respectivement une diminution du temps de début de prise de l’ordre de 2.2% et 4.45%. Cela suggère un léger effet accélérateur de la prise à des dosages modérés de PCO. En revanche, avec 9 % de PCO, le début de prise est égal au temps du mélange témoin. Le mélange combiné contenant 3 % de PCO et 5 % de fumée de silice (FS) présente une augmentation du temps de début de 2.2%, indiquant un effet retardateur qui peut être attribué à la forte finesse et à l’activité pouzzolanique de la FS, qui ralentit le processus d’hydratation initial.

Nous pouvons également constater à partir des résultats obtenus que le temps de prise (différence entre temps de début de prise et temps de fin de prise) augmente avec l’augmentation du pourcentage de PCO. Le temps de prise de la pâte témoin est 60 minutes, tandis qu’il est 70 minutes pour celle contenant 3% PCO, 95 minutes pour 6% de PCO et 109 minutes pour celle contenant 9% de PCO. Cela indique que la PCO prolonge le temps de prise, notamment à des concentrations élevées, ce qui peut être avantageux dans certaines conditions comme le bétonnage par temps chaud. En revanche, le mélange combiné de 3 % de PCO et 5 % de fumée de silice présente un temps de prise identique à celui du témoin (60 min).

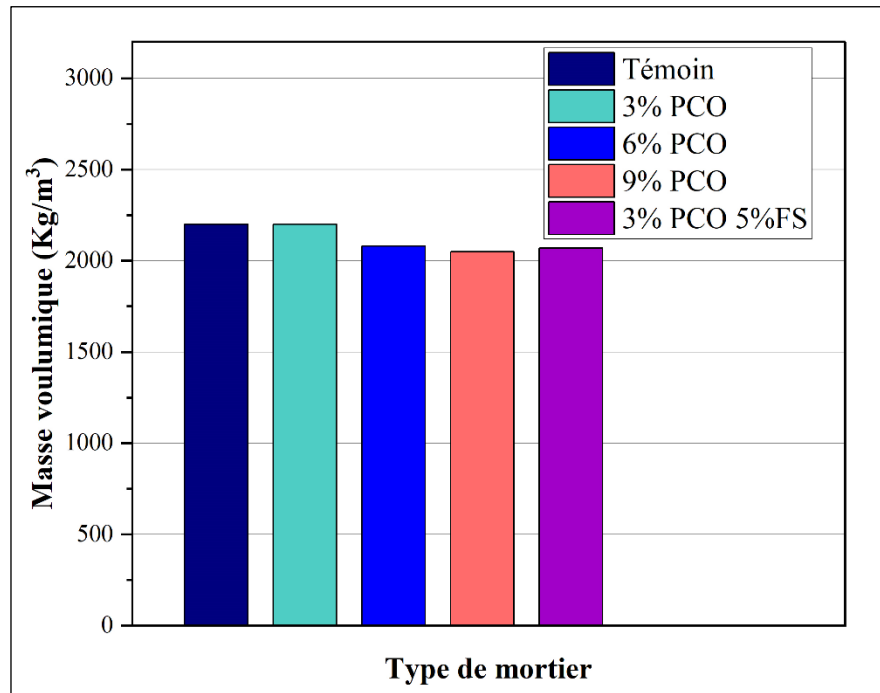
Alors, les résultats de mesure des temps de prise dans cette étude montrent que la PCO à faible dosage (3 et 6%) accélère légèrement le début de prise de ciment. Ce comportement est en accord avec les résultats rapportés par Ujin et al. [Ujin et al., 2016] qui ont observé une accélération des temps de début et de fin de prise pour des pourcentages de PCO compris entre 0,1 % et 2 %. Cette accélération peut être attribuée à la teneur en CaO dans la PCO calcinée, qui favorise la réaction d'hydratation du ciment en augmentant la vitesse de formation des produits hydratés [Pliya et Cree, 2015].

Pour évaluer l'effet de la poudre de coquilles d'œufs et la fumée de silice sur la consistance de la pâte de ciment, la pénétration de la sonde de consistance a été mesurée pour chacun des mélanges et les résultats sont présentés dans le Tableau III.1. L'analyse des résultats montre une diminution de la consistance de la pâte avec l'ajout de PCO, particulièrement en combinaison avec la fumée de silice (FS). Cette baisse de consistance peut être attribuée à la forte finesse de ces ajouts, notamment celle de la fumée de silice, ainsi qu'à leur capacité à absorber une partie de l'eau de gâchage, ce qui réduit l'eau libre disponible dans le mélange. Ces résultats sont en accord avec ceux rapportés par Dhanalakshmet al. [Dhanalakshmet et al., 2015] qui ont observé que l'augmentation du pourcentage de PCO entraîne une diminution de la maniabilité du béton. Zain et al. [Zain et al., 2021] ont expliqué que la faible ouvrabilité observée est due à la porosité de la PCO, qui absorbe une quantité importante d'eau. Cela indique qu'un rapport E/C plus élevé est nécessaire pour les mélanges contenant de la PCO, en particulier pour les mélanges contenant de la fumée de silice, afin de permettre un processus d'hydratation optimal et de favoriser la réaction pouzzolanique.

L'expansion mesurée selon l'essai Le Chatelier, présentée dans le Tableau III.1, montre que l'incorporation jusqu'à un pourcentage de 9 % de PCO ne provoque aucune variation significative de l'expansion volumique du ciment. Cette stabilité indique que l'ajout de PCO n'altère pas l'expansion volumique du liant. Ces résultats sont en accord avec ceux rapportés par Al-Safy [Al-Safy, 2015], qui a démontré que l'incorporation jusqu'à 10 % de la PCO dans le ciment n'entraîne aucune expansion volumique par rapport au ciment ordinaire.

III.2. Étude de l'effet de Poudre de coquilles d'œufs sur la masse volumique du mortier :

La Figure III.2 montre la variation de la masse volumique apparente des différents mortiers étudiés à base de la poudre de coquilles d'œufs (PCO).



Graphes III. 2 Variation de la masse volumique avec le pourcentage de la poudre de coquilles d'œufs (PCO). (Source : Auteurs)

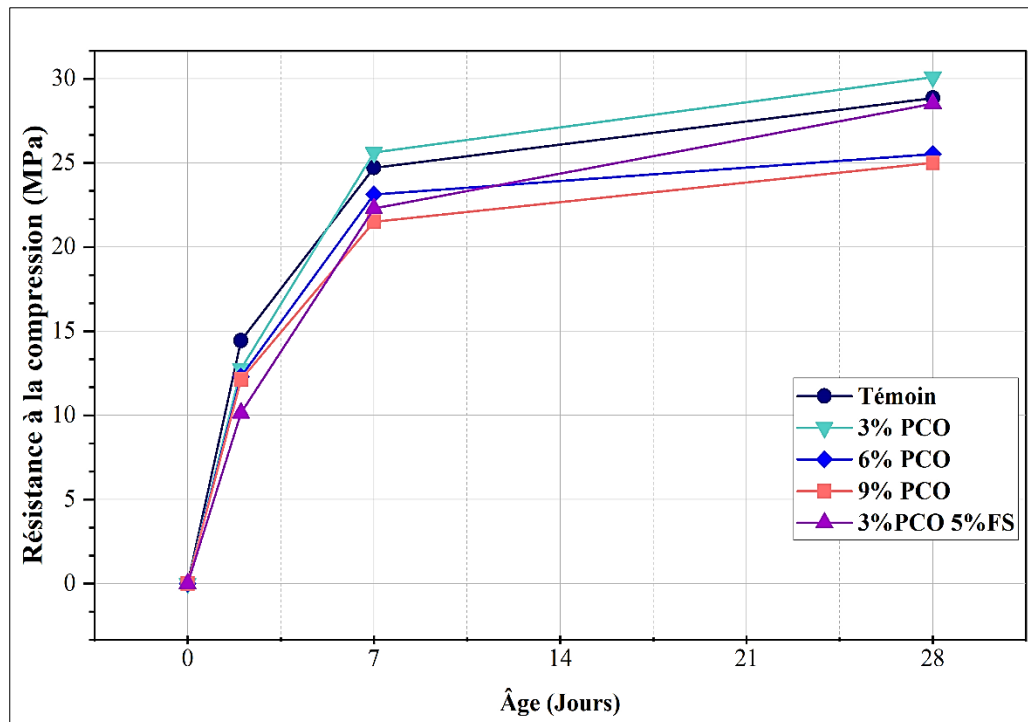
L'analyse des résultats présentés dans la Figure III.2 montre que l'incorporation de la poudre de coquilles d'œufs (PCO) dans le mortier influence clairement la masse volumique. Les résultats ont montré qu'aucun changement n'a été enregistré à 3 %, mais à 6 % et 9 %, une diminution progressive et notable de la densité est observée, passant de 2200 kg/m³ à 2080 kg/m³ puis à 2050 kg/m³ respectivement. Cette réduction s'explique principalement par la masse volumique intrinsèquement plus faible de la PCO par rapport au ciment (Tableau II.7). Ces résultats sont en accord avec des études antérieures ([Sathiparan, 2021], [Yerramala, 2014], [Hama, 2017], [Dhanalakshmet et al., 2015]). Le mélange combiné (3 % PCO + 5 % fumée de silice) présente une masse volumique légèrement plus élevée que le mélange de 3 % PCO, ce qui peut s'expliquer par la densité plus faible de la fumée de silice.

III.3. Étude de l'effet de la poudre de coquilles d'œufs sur la résistance mécanique du mortier:

Dans cette étude, une comparaison rigoureuse sera effectuée entre les propriétés du mortier témoin, préparé sans ajout de PCO, sont comparés à ceux des mortiers contenant 3%, 6% et 9% de cette poudre. Une formulation combinée contenant 3 % de poudre de coquilles d'œufs et 5 % de fumée de silice (FS) a été aussi étudiée. L'influence la PCO sur la résistance mécanique de mortier est présentée dans le Tableau III.2 et les variations de la résistance en fonction du temps sont illustrées dans les Figures III.3 et III.4.

Tableau III. 2 Résistance mécanique du mortier en fonction du pourcentage de la poudre de coquilles d'œufs (PCO). (Source : Auteurs)

Teneur en sucre en % du poids du ciment	Résistance moyenne à la traction par flexion (MPa)			Résistance moyenne à la compression (MPa)		
	2 jours	7 jours	28 jours	2 jours	7 jours	28 jours
Témoin	2.78	4.34	4.78	14.44	24.72	28.85
3% PCO	2.64	3.71	4.33	12.76	25.62	30.1
6% PCO	2.39	3.15	3.93	12.3	23.13	25.53
9% PCO	2.18	3	4	12.14	21.51	25
3% PCO + 5%FS	1.81	3.9	4.1	10.15	22.3	28.52



Graph III. 3 Variation de la résistance à la compression du mortier en fonction du pourcentage de la poudre de coquilles d'œufs (PCO). (Source : Auteurs)

L'analyse des résultats présentés dans le Tableau III.2 et la Figure III.3 montrent une diminution progressive de la résistance à la compression avec l'augmentation de pourcentage de l'incorporation de la poudre de coquilles d'œufs (PCO), seule ou en combinaison avec la fumée de silice. À l'âge de 2 jours, une baisse notable de la résistance à la compression avec l'ajout de la PCO. Par rapport au mélange témoin, les résistances diminuent de 11,6 %, 14,8 % et 15,9 % respectivement pour les dosages de 3 %, 6 % et 9 % de PCO. L'effet est encore plus élevé avec le mélange combiné contenant 3 % de PCO et 5 % de fumée de silice (FS), qui présente une chute de 29,7 %. À l'âge de 7 jours, une amélioration est observée pour le mélange contenant 3 % de PCO, avec une augmentation de 3,64 % par rapport au témoin. En revanche, les mélanges contenant des pourcentages plus élevés de PCO entraînent une baisse de résistance avec une baisse de 6,43 % pour 6 % PCO, 13 % pour 9 % PCO et 9,8 % pour le mélange combiné.

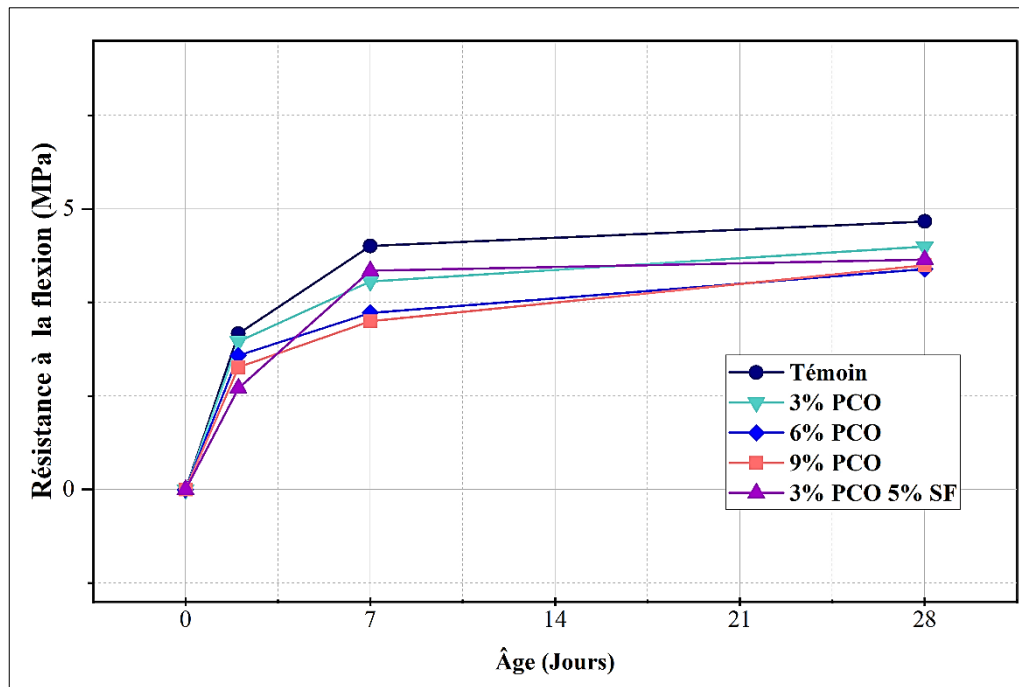
À 28 jours, le mélange contenant 3 % de PCO présente toujours une résistance supérieure à celle de mélange témoin avec une augmentation de 4,3 %. En revanche, une diminution progressive de la résistance est observée : la résistance diminue par 11,5 % pour le mélange

6% PCO et par 13.3% pour le mélange 9% PCO. La résistance de mélange combiné (3%PCO + 5% FS) est presque similaire à celle du mélange témoin.

La légère amélioration de la résistance observée dans cette étude pour le pourcentage de remplacement de 3 % de PCO pourrait s'expliquer par une réaction chimique entre le CaO présente dans la PCO et les composants du ciment [Sathiparan, 2021], qui accélère l'hydratation initiale. En revanche, à des taux de substitution plus élevés, la diminution progressive de la résistance mécanique peut être attribuée à une interaction plus marquée entre les particules de PCO et la zone de transition de la matrice cimentaire qui pourrait perturber la compacité et la cohésion de la pâte, ce qui conduit à la diminution de la résistance [Cree et Pliya, 2019]. Les résultats de cette étude sont en accord avec les résultats des études antérieures qui trouve que la résistance à la compression diminue si le pourcentage de remplacement est supérieur à 5% [Hamada et al., 2020].

Les résultats de la résistance à la compression montrent une augmentation progressive de la résistance pour tous les mélanges avec l'augmentation de l'âge de cure. Le mortier témoin a atteint environ 50 % de sa résistance à 28 jours après 2 jours, et 85 % après 7 jours. À 2 jours, les mélanges contenant 3 %, 6 % et 9 % de PCO ont atteint respectivement 42 %, 48.1% et 48,6 % de leur résistance à 28 jours. Ces résultats indiquent le développement initial de la résistance est faible pour les mélanges à base de PCO, en comparaison avec le mélange témoin. À 7 jours, les résistances obtenues se situent entre 81 % et 90 % par rapport à leurs résistances à 28 jours. Le gain de résistance entre 7 et 28 jours pour les mélanges contenant 6% et 9% PCO est plus limité par rapport à celui du témoin. Ces résultats montrent qu'à des pourcentages élevés, la PCO pourrait limiter la progression ultérieure de la résistance. Ces résultats sont en accord avec les observations de Yerramala [Yerramala, 2014] sur la résistance de béton contenant différents pourcentages de PCO. Le mélange combiné (3 % PCO + 5 % de fumée de silice) a développé environ 36 % de sa résistance à 28 jours à 2 jours et 78 % après 7 jours. Le gain de résistance entre 7 et 28 jours est plus élevé à celui du témoin. Par ailleurs, une augmentation supplémentaire de la résistance pourrait être envisagée pour ce mélange, notamment en présence d'humidité suffisante, favorisant la poursuite des réactions pouzzolaniques.

Ces résultats indiquent qu'une faible teneur en PCO peut être bénéfique, comme pour le mélange de 3% PCO. Cela suggère que le PCO peut être valorisé de manière optimale dans des formulations à faible taux de remplacement (3 %).



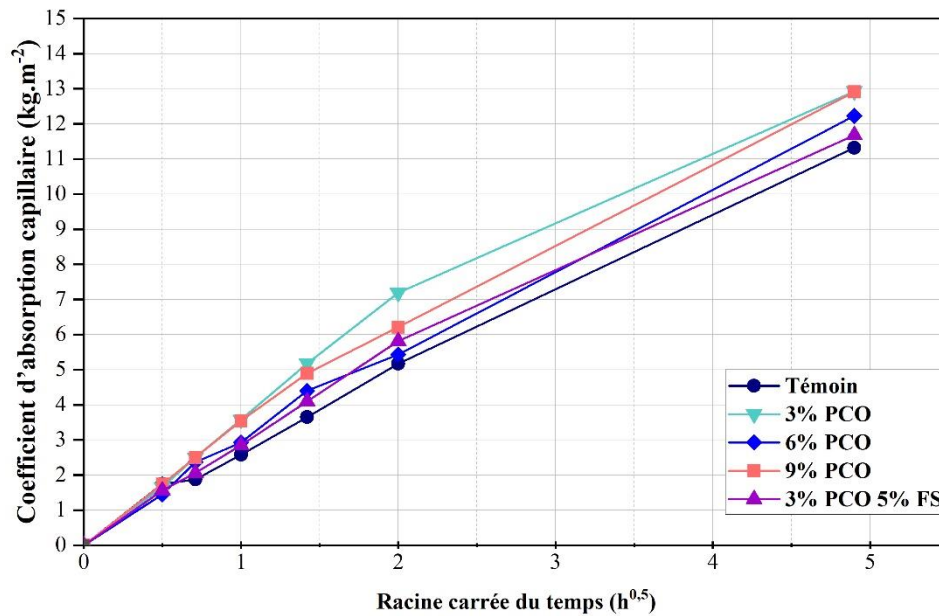
Graphé III. 4 Variation de la résistance à la traction du mortier en fonction du pourcentage de la poudre de coquilles d'œufs (PCO). (Source : Auteurs)

Le Tableau III.2 et la Figure III.4 montrent que l'ajout de poudre de coquilles d'œufs (PCO) influence également le développement de la résistance à la traction. À 2 jours, les mélanges contenant 3 %, 6 % et 9 % de PCO ont atteint respectivement 61,0 %, 60,8 % et 54,5 % de leur résistance à 28 jours, contre 63,5 % pour le mélange témoin. À 7 jours, bien que tous les mélanges aient enregistré une nette progression, le témoin atteint 90,8 % de sa résistance à 28 jours, tandis que les mélanges à base de PCO présentent entre 75 % et 85,7 %. Ces résultats montrent que, comme la résistance à la compression l'ajout de PCO tend à ralentir le développement de la résistance à la traction entre 7 et 28 jours. Le mélange combiné (3 % PCO + 5 % de fumée de silice) a développé environ 44 % de sa résistance à 28 jours à 2 jours et 95 % après 7 jours. Le gain de résistance entre 7 et 28 jours est plus élevé à celui du témoin.

III.4. Étude de la poudre de coquilles d'œufs sur la durabilité du mortier :

III.4.1. Absorption capillaire

Les résultats de l'essai d'absorption capillaire pour les différentes formulations de mortiers étudiées sont illustrés dans la Figure III.5. L'absorptivité des différents mortiers est présentée dans la Tableau III.3.



Graph III. 5 Effet de la poudre de coquilles d'œufs (PCO) sur l'absorption capillaire de mortier. (Source : Auteurs)

Tableau III. 3 Variation de l'absorptivité du mortier en fonction du pourcentage de la poudre de coquilles d'œufs (PCO). (Source : Auteurs)

Mélanges	Témoin	3% PCO	6% PCO	9% PCO	3% PCO+ 6% FS
C_a ($Kg.m^{-2}.h^{-1/2}$)	2.58	2.66	2.5	2.66	2.96

L'analyse des résultats présentés dans la Figure III.5 montre que tous les mortiers montrent une augmentation progressive de l'absorption capillaire avec le temps. L'ajout de PCO augmente l'absorption capillaire par rapport au témoin, particulièrement à 9 % PCO. Cette tendance est en accord avec les observations de Hama [Hama, 2017] et contredit certaines recherches qui montrent que l'absorption d'eau des bétons contenant de la poudre de coquilles d'œufs est inférieure à celle du béton témoin ([Yerramala, 2014], [Tan et al., 2018], [Beng We et al., 2020], [Jaber et al., 2020]). Cette évolution suggère que l'incorporation de PCO, surtout à des dosages élevés, tend à accroître la porosité capillaire du mortier, probablement en raison d'une structure moins dense de la matrice cimentaire.

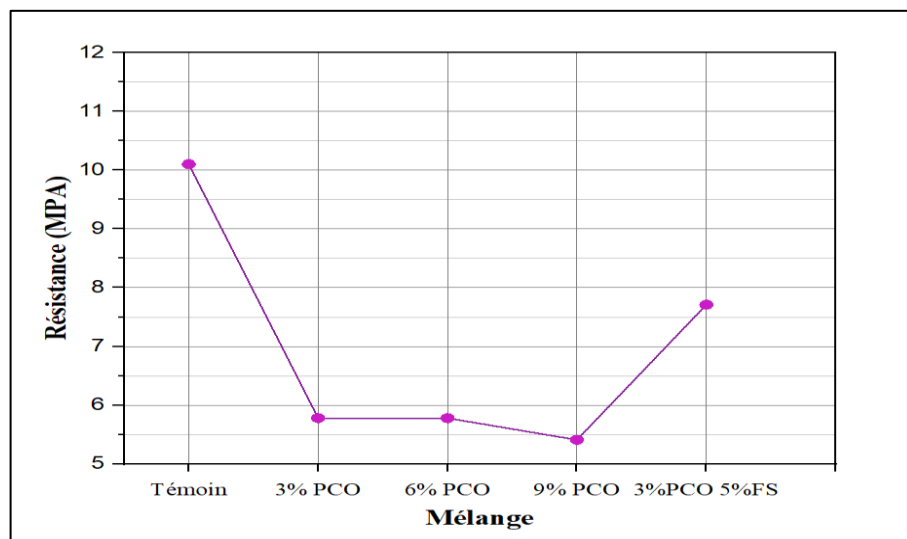
L'absorption capillaire mesurée après 24 heures montre une augmentation de 8 % et 14 % respectivement pour les mélanges contenant 6 % et 9 % de PCO. En revanche, le mélange combiné contenant 3 % de PCO et 5 % de fumée de silice présente une augmentation moins marquée, d'environ 3 % seulement. Il est à noter que la proportion de 3 % de PCO seule donne des résultats d'absorption capillaire similaires à ceux obtenus avec 9 % de PCO, ce qui indique que l'effet de l'augmentation de la proportion n'est pas nécessairement linéaire.

Cette diminution de l'absorption dans le cas de la présence de la fumée de silice peut être attribuée à son rôle dans la réduction de la porosité au niveau de la zone de transition entre la matrice cimentaire et les granulats, créant ainsi une zone de transition plus dense et homogène [Parthasarathi et al., 2017].

L'analyse des résultats présentés dans le tableau III.3 montre que le mortier composite présente la vitesse d'absorption la plus élevée (entre la 2^e et la 4^e heure). Le mortier contenant 6 % de poudre de coquilles d'œufs affiche une vitesse d'absorption comparable à celle du témoin, tandis que le mortier à 9 % de PCO présente une absorption légèrement supérieure à celle du mortier témoin.

III.4.2. Résistance à l'attaque acide

La résistance à l'attaque acide des mortiers contenant différents pourcentages de PCO soumis à une attaque acide pendant 28 jours est illustrée dans les Figures III.6 et III.7.

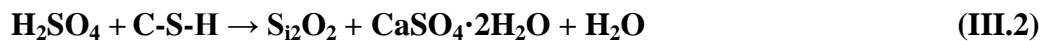


Graphes III. 6 Perte de la résistance à la compression sous attaque acide. (Source : Auteurs)

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

Cette perte de résistance mécanique est le résultat des réactions chimiques entre l'acide et les constituants du ciment.

Le H_2SO_4 , réagit avec la portlandite (CH) et les silicates de calcium hydratés (C-S-H), qui sont les principaux hydrates du ciment Portland. Au cours de ces réactions, la CH et les C-S-H se dissolvent, tandis que le gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) précipite, selon les équations suivantes [Yuan *et al.*, 2013] :



Ce processus peut réduire les performances du béton, car le gypse possède une résistance mécanique quasiment nulle [Yuan *et al.*, 2013]

Le mortier témoin présente une perte de résistance de 65 %, les mélanges contenant de la PCO montrent une dégradation encore plus prononcée de l'ordre de 80%. Cette tendance indique que l'incorporation de PCO, pourrait augmenter la vulnérabilité du mortier aux milieux acides, possiblement en raison de la formation d'une teneur en CH plus élevée que celle formée dans le mortier témoin. Ces résultats sont en accord avec ceux rapportés par d'autres études ([Beng We *et al.*, 2020], [Tan *et al.*, 2018]). En revanche, le mélange combiné (3 % PCO + 5 % de fumée de silice) montre une perte de 72 %, soit une résistance résiduelle plus élevée que les autres mélanges à base de PCO. Cela suggère un effet bénéfique de la fumée de silice contre l'attaque des milieux agressives [Parthasarathi *et al.*, 2017].

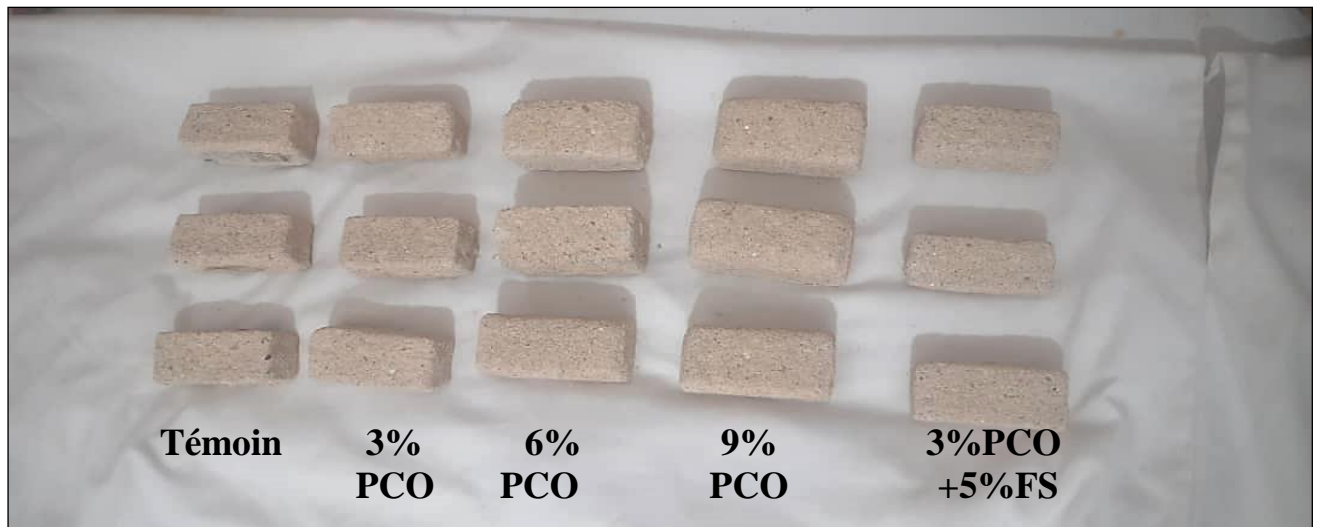


Figure III. 1 Aspect visuel des mortiers après immersion dans l'acide. (Source : Auteurs)

L'observation visuelle des éprouvettes après immersion dans la solution acide (Figure III.8) met en évidence les différences de l'attaque acide selon la composition du mortier. Ces observations supportent les résultats mécaniques

Conclusion :

Les résultats de ce chapitre confirment l'effet évident du remplacement partiel du ciment par la poudre de coquilles d'œufs (PCO) sur les propriétés du mortier, tant à l'état frais qu'à l'état durci. Les essais ont montré que la PCO accélère le début de la prise, ce qui reflète son rôle d'accélérateur initial, tandis qu'elle prolonge le temps de fin de prise à des taux élevés, en raison de son effet retardateur à long terme. Une diminution de la masse volumique du mortier durci a également été observée, ce qui s'explique par la densité plus faible de la PCO comparée à celle du ciment classique.

Sur le plan mécanique, on note une baisse progressive de la résistance avec l'augmentation du taux de substitution, mais le taux de 3 % apparaît comme optimal, assurant un bon compromis entre performance et durabilité. Par ailleurs, l'augmentation de la porosité entraîne une élévation de l'absorption d'eau, tandis que l'ajout de cendres volantes améliore la structure interne en réduisant la perméabilité et en augmentant la compacité. Cette combinaison permet de limiter l'effet des vides et de renforcer la durabilité globale du matériau.

En ce qui concerne la résistance aux environnements agressifs, les résultats ont montré que des taux de substitution compris entre 6 % et 9 % contribuent à réduire la perte de masse lors d'une exposition à l'acide sulfurique, traduisant une amélioration significative de la résistance chimique. Dans l'ensemble, ces résultats mettent en évidence le potentiel prometteur de la PCO dans le développement de mortiers écologiques, conciliant exigences mécaniques et durabilité environnementale.

.

Conclusion Générale et Perspectives

Conclusion générale :

Ce travail de recherche s'inscrit dans une démarche de valorisation des déchets issus de l'industrie agroalimentaire, en particulier les coquilles d'œufs, en tant que matériau alternatif dans le domaine de la construction. L'objectif principal était d'étudier l'effet de remplacement partiel du ciment par la poudre de coquilles d'œufs (PCO), seule ou en combinaison avec la fumée de silice (FS), sur les propriétés physiques, mécaniques et durabilité des mortiers cimentaires.

Sur la base des types de matériaux, des procédures de préparation (traitement thermique de la PCO) et des pourcentages de substitution utilisés dans cette recherche, les conclusions suivantes ont été obtenues :

- ✓ L'incorporation de la PCO à faible dosage (3 et 6%) accélère légèrement le début de prise de ciment et retarde le temps de fin de prise, ce qui offre une plus grande flexibilité pratique, surtout dans certaines conditions comme le bétonnage par temps chaud.
- ✓ À l'état frais, l'incorporation de la poudre de coquilles d'œufs (PCO) entraîne une augmentation de la demande en eau afin d'obtenir une consistance normale. Cela indique qu'un rapport eau/ciment (E/C) plus élevé est nécessaire pour les mélanges contenant de la PCO, en particulier lorsqu'elle est combinée à la fumée de silice, dont la finesse accentue encore cette exigence en eau.
- ✓ L'incorporation jusqu'à un pourcentage de 9 % de PCO ne provoque aucune variation significative de l'expansion volumique du ciment.
- ✓ L'utilisation de la poudre de coquilles d'œufs comme substitut partiel du ciment entraîne une réduction progressive de la densité du mortier. Cette diminution peut constituer un avantage potentiel pour la production de mortiers légers.
- ✓ À faible pourcentage (3%), la PCO peut légèrement améliorer la résistance à la compression à l'âge de 7 et 28 jours. Toutefois, des pourcentages plus élevés (6 % et 9 %) induisent une baisse de la résistance.
- ✓ Le mélange combiné (3 % PCO + 5 % de fumée de silice) présente une résistance à 28 jours presque égale à celle du mélange témoin. Cela montre qu'il est possible de remplacer jusqu'à 8 % du ciment sans compromettre significativement les performances mécaniques du mortier.

- ✓ L'incorporation de PCO, surtout à des dosages élevés, tend à accroître la porosité capillaire du mortier. Cependant, l'ajout de fumée de silice contribue à limiter cette augmentation en réduisant la porosité de la matrice cimentaire.
- ✓ L'incorporation de la PCO augmente la vulnérabilité du mortier aux milieux acides, ce qui rend le mortier à base de PCO moins adapté aux environnements agressifs par rapport au mortier témoin. Cependant, l'ajout de fumée de silice (FS) atténue cet effet, faisant de cette formulation une alternative plus durable et plus performante dans les environnements acides.

Dans l'ensemble, les résultats suggèrent que la poudre de coquilles d'œufs peut être valorisée comme ajout cimentaire à condition de limiter son taux de substitution à 3 %. L'association de ces pourcentages avec la fumée de silice permet d'en compenser certaines limites, en réduisant la porosité de la matrice et en améliorant la résistance à l'agression chimique. Ainsi, l'utilisation combinée de la poudre de coquilles d'œufs (PCO) et de la fumée de silice (FS) constitue une piste prometteuse pour réduire l'empreinte environnementale liée à la production du ciment, tout en maintenant des performances mécaniques et durabilité satisfaisantes.

Perspectives

Suite à cette étude, plusieurs perspectives peuvent être envisagées:

- ✚ Évaluer la durabilité du mortier à base de PCO et de FS face à d'autres agents agressifs (sulfates, cycles gel/dégel, carbonatation...).
- ✚ Étudier l'impact de PCO sur d'autres mélanges de mortier en utilisant, par exemple en utilisant un rapport E/C variable.
- ✚ Compléter les essais nécessaires sur le mortier à base de PCO et de FS, y compris les analyses au microscope électronique à balayage (MEB), les essais de diffraction des rayons X (DRX) et les essais de corrosion des armatures.

Références:

- Commey, A. (2019). The effect of eggshell powder as partial supplement of ordinary portland cement on the compressive strength of sand creteblocks, *International Journal of Innovative Science and Research Technology*, 4(9), 779–782.
- Cree, D., & Pliya, P. (2019). Effect of elevated temperature on eggshell, eggshell powder and eggshell powder mortars for masonry applications. *Journal of Building Engineering*, 26, 100852.
- Cree, D., & Rutte, A. (2015). Sustainable Bio-Inspired Limestone Eggshell Powder for Potential Industrialized Applications. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, 3, 941-949.
- Dhanalakshmi, M., Sowmya, N. J., & Chandrashekar, A. (2015). A Comparative Study on Egg Shell Concrete with Partial Replacement of Cement by Fly Ash. *International Journal of Engineering Research & Technology*, 4(5), 1532–1538.
- Ferraz, E., Gamelas, J. A. F., Coroado, J., Monteiro, C., & Rocha, F. (2018). Eggshell waste to produce building lime: Calcium oxide reactivity, industrial, environmental and economic implications. *Materials and Structures*, 51, 115.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Livestock Primary - Eggs primary: egg production, 2025. <https://ourworldindata.org/grapher/egg-production-thousand-tonnes/2025> (consulter le 18 avril 2025).
- Francis, A. A., & Abdel Rahman, M. K. (2016). The environmental sustainability of calcined calcium phosphates production from the milling of eggshell wastes and phosphoric acid. *Journal of Cleaner Production*, 137, 1432–1438, 1432e1438. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.08.029>
- Freire, M. N., & Holanda, J. N. F. (2006). Characterization of avian eggshell waste aiming its use in a ceramic wall tile paste. *Cerâmica*, 52(324), 240–244. <https://doi.org/10.1590/S0366-69132006000400004>

- Hama, S. M. (2017). Improving mechanical properties of lightweight Porcelanite aggregate concrete using different waste material. *International Journal of Sustainable Built Environment*, 6, 81–90.
- Hamada, H. M., Tayeh, B. A., Al-Attar, A., Yahaya, F. M., Muthusamy, K., & Humada, A. M. (2020). The present state of the use of eggshell powder in concrete: A review. *Journal of Building Engineering*, 32, 101583. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101583>
- Ing, D. S., Azed, M. A., & Chin, S. C. (2017). A comparative study on different burning method of sewage sludge ash in mortar brick with eggshell powder as additive. *AIP Conference Proceedings*, 1903.
- Ing, D.S., & Choo, C.S., (2014). Eggshell powder: potential filler in concrete, 8th *Malaysian Technical Universities Conference on Engineering and Technology*.
- Jaber, H. A., Mahdi, R. S., & Hassan, A. K. (2020). Influence of eggshell powder on the Portland cement mortar properties. *Materials Today: Proceedings*, 20, 391–396. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.09.153>
- Khalid, N. H. A., Rasid, N. N. A., Sam, A. R. M., Lim, N. H. A. S., Ismail, M., Zardasti, L., Mohamed, A., Majid, Z. A., & Ariffin, N. F. (2018). Characterization of palm oil fuel ash and eggshell powder as partial cement replacement in concrete. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 431(3), 032002.
- Kosmatka, S.H., & Wilson, M.L. (2011), *Design and Control of Concrete Mixtures*, 15th ed., Portland Cement Association, Skokie, USA.
- Malkanthi, S. N., Balthazaar, N., & Perera, A.A.D.A. J. (2020). Lime stabilization for compressed stabilized earth blocks with reduced clay and silt, *Case Studies in Construction Materials*, 12, e00326.
- Mashri, M. O. M., Johari, M. A. M., Mijarsh, M. J. A., & Ahmad, Z. A. (2020). Effect of various grades of Na_2SiO_3 on compressive strength development of eggshells powder-based alkaline activated mortar. *AWAM International Conference on Civil Engineering*, 53, 453–461.

- Mohadi, R., Anggraini, K., Riyanti, F., & Lesbani, A. (2016). Preparation calcium oxide (CaO) from chicken eggshells. *Sriwijaya Journal of Environment*, 1, 32–35. <https://doi.org/10.22135/sje.2016.1.2.32-35>
- Mohamad, M. E., Mahmood, A. A., Min, A. Y. Y., & Ar, N. N. (2018). Palm oil fuel ash (POFA) and eggshell powder (ESP) as partial replacement for cement in concrete. *E3S Web of Conferences*, 34, 01004. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20183401004>
- Ojuri, O. O., Adavi, A. A., & Oluwatuyi, O. E. (2017). Geotechnical and environmental evaluation of lime–cement stabilized soil–mine tailing mixtures for highway construction. *Transportation Geotechnics*, 10, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2016.10.001>
- Oluwatuyi, O.E., Adeola, B.O., Alhassan, E.A., Nnochiri, E.S., Modupe, A.E., Elemile, O.O., Obayanju, T., & Akerele, G. (2018). Ameliorating effect of milled eggshell on cement stabilized lateritic soil for highway construction, *Case Study in Construction Materials*, 9, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2018.e00191>
- Palomo, A., Grutzeck, M. W., & Blanco, M. T. (1999). Alkali-activated fly ashes: A cement for the future. *Cement and Concrete Research*, 29(8), 1323–1329.
- Parthasarathi, N., Prakash, M., & Satyanarayanan, K. S. (2017). Experimental study on partial replacement of cement with egg shell powder and silica fume. *Rasayan Journal of Chemistry*, 10(2), 442–449.
- Pliya, P., & Cree, D. (2015). Limestone derived eggshell powder as a replacement in Portland cement mortar. *Construction and Building Materials*, 95, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.103>
- Prusinski, J. R., & Bhattacharja, S. (1999). Effectiveness of Portland cement and lime in stabilizing clay soils. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1652, 215–227.
- Quina, M. J., Soares, M. A. R., & Quinta-Ferreira, R. (2017). Applications of industrial eggshell as a valuable anthropogenic resource. *Resources, Conservation and Recycling*, 123, 176–186. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.09.027>

- Razali, N., Azizan, M. A., Pa'ee, K. F., Razali, N., & Jumadi, N. (2020). Preliminary studies on calcinated chicken eggshells as fine aggregates replacement in conventional concrete. *Materials Today: Proceedings*, 31, 354–359. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.06.232>
- Sathiparan, N . (2021). Utilization prospects of eggshell powder in sustainable construction material – A review . *Construction and Building Materials*, 293, 123465 <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123465>
- Sharma, A. K., & Sivapullaiah, P. V. (2016). Ground granulated blast furnace slag amended fly ash as an expansive soil stabilizer. *Soils and Foundations*, 56(2), 205–212. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2016.02.004>
- Shekhawat, P., Sharma, G., & Singh, R. M. (2019). Strength behavior of alkaline activated eggshell powder and flyash geopolymer cured at ambient temperature. *Construction and Building Materials*, 223, 1112–1122. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.325>
- Surjandari, N. S., Dananjaya, R. H., & Ely, J. S. (2018). The effect of egg shell powder on the compression strength of fine-grained soil. *MATEC Web of Conferences*, 195, 03011. <https://doi.org/10.1051/matecconf/201819503011>
- Tan, Y.Y., Doh, S.I., & Chin, S. C. (2018). Investigations on rheological and mechanical properties of self-compacting concrete (SCC) containing 0.6 µm eggshell as partial replacement of cement. *Magazine of Concrete Research*, 70(13), 662-670.
- Tangboriboon, N., Moonsri, S., Netthip, A., Sangwan, W., & Sirivat, A. (2019). Enhancing physical-thermal-mechanical properties of fired clay bricks by eggshell as a bio-filler and flux. *Science of Sintering*, 51, 1–13.
- Tsai, W., Hsien, K., Hsu, H., Lin, C., & Lin, K. (2008). Utilization of ground eggshell waste as an adsorbent for the removal of dyes from aqueous solution. *Bioresource Technology*, 99, 1623–1629. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.04.010>
- Ujin, F., Ali, K. S., & Harith, Z. Y. H. (2016). Viability of eggshells ash affecting the setting time of cement. *World Academy of Science, Engineering and Technology*,

International Journal of Civil, Environmental, Structural, Construction and Architectural Engineering, 10(4), 342–346.

Yerramala, A. (2014). Properties of concrete with eggshell powder as cement replacement, *Indian Concrete Journal*, 88(10), 94–102.

Zain, M. R. M., Oh, C. L., & Lee, S. W. (2021). Investigations on rheological and mechanical properties of self-compacting concrete (SCC) containing 0.6 µm eggshell as partial replacement of cement. *Construction and Building Materials*, 303, 124539. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124539>

Zaman, T., Mostari, M. S., Al Mahmood, M. A., & Rahman, M. S. (2018). Evolution and characterization of eggshell as a potential candidate of raw material. *Cerâmica*, 64(370), 236–241. <https://doi.org/10.1590/0366-69132018643702349>

Amin, M. N., Ahmad, W., Khan, K., Al-Hashem, M. N., Deifalla, A. F., & Ahmad, A. (2023). Testing and modeling methods to experiment the flexural performance of cement mortar modified with eggshell powder. *Case Studies in Construction Materials*, 18, e01759. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01759>

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Hamada, H. M., Tayeh, B. A., Al-Attar, A., Yahaya, F. M., Muthusamy, K., & Humada, A. M. (2020). The present state of the use of eggshell powder in concrete: A review. *Journal of Building Engineering*, 32, 101583. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101583>

- Indian Standard. (2005). *IS :4031 (Part 6) : Methods Of Physical Tests For Hydraulic Cement - Part 6 : Determination Of Compressive Strength Of Hydraulic Cement Other Than Masonry Cement*. BUREAU OF INDIAN STANDARDS
- Institut Algérien de Normalisation. (2013). *Norme Algérienne NA442. Ciment-Composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants*.
- Lafarge. (n.d). (2025). *Ciment Matine* [Fiche produit]. Tiré de : <https://www.lafarge.dz/sites/algeria/files/docs/fiche-produit-ciment-matine-tm-en-francais.pdf>
- Parthasarathi, N., Prakash, M., & Satyanarayanan, K. S. (2017). Experimental study on partial replacement of cement with egg shell powder and silica fume. *Rasayan Journal of Chemistry*, 10(2), 442–449.
- Sathiparan, N . (2021). Utilization prospects of eggshell powder in sustainable construction material – A review . *Construction and Building Materials*, 293, 123465 <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123465>
- TeknaChem. (n.d). (2025). *Ciltek Powder* [Fiche produit]. Tiré de : https://www.teknachem.com/SITE_WEB/assets/ft/SILTEK_POWDER.pdf
- Al-Safy, R. A. (2015). Experimental investigation on properties of cement mortar incorporating eggshell powder. *Journal of Engineering and Sustainable Development*, 19(6), 198–209. <https://jeasd.uomustansiriyah.edu.iq/index.php/jeasd/article/view/790>
- Beng Wei, C., Othman, r., Ying, C.Y., Jaya, R. P., Ing, D. S. & MAng, S. A. (2015). Properties of mortar with fine eggshell powder as partial cement replacement. *Materials Today: Proceedings*, 46, 1574-1581.
- Cree, D., & Pliya, P. (2019). Effect of elevated temperature on eggshell, eggshell powder and eggshell powder mortars for masonry applications. *Journal of Building Engineering*, 26, 100852.
- Dhanalakshmi, M., Sowmya, N. J., & Chandrashekar, A. (2015). A Comparative Study on Egg Shell Concrete with Partial Replacement of Cement by Fly Ash. *International Journal of Engineering Research & Technology*, 4(5), 1532–1538.

- Jaber, H. A., Mahdi, R. S., & Hassan, A. K. (2020). Influence of eggshell powder on the Portland cement mortar properties. *Materials Today: Proceedings*, 20, 391–396. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.09.153>
- Hama, S. M. (2017). Improving mechanical properties of lightweight Porcelanite aggregate concrete using different waste material. *International Journal of Sustainable Built Environment*, 6, 81–90.
- Hamada, H. M., Tayeh, B. A., Al-Attar, A., Yahaya, F. M., Muthusamy, K., & Humada, A. M. (2020). The present state of the use of eggshell powder in concrete: A review. *Journal of Building Engineering*, 32, 101583. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101583>
- Parthasarathi, N., Prakash, M., & Satyanarayanan, K. S. (2017). Experimental study on partial replacement of cement with egg shell powder and silica fume. *Rasayan Journal of Chemistry*, 10(2), 442–449.
- Pliya, P., & Cree, D. (2015). Limestone derived eggshell powder as a replacement in Portland cement mortar. *Construction and Building Materials*, 95, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.103>
- Sathiparan, N . (2021). Utilization prospects of eggshell powder in sustainable construction material – A review . *Construction and Building Materials*, 293, 123465 <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123465>
- Tan, Y.Y., Doh, S.I., & Chin, S. C. (2018). Investigations on rheological and mechanical properties of self-compacting concrete (SCC) containing 0.6 µm eggshell as partial replacement of cement. *Magazine of Concrete Research*, 70(13), 662-670.
- Ujin, F., Ali, K. S., & Harith, Z. Y. H. (2016). Viability of eggshells ash affecting the setting time of cement. *World Academy of Science, Engineering and Technology, International Journal of Civil, Environmental, Structural, Construction and Architectural Engineering*, 10(4), 342–346.
- Yerramala, A. (2014). Properties of concrete with eggshell powder as cement replacement, *Indian Concrete Journal*, 88(10), 94–102.

- Yerramala, A. (2014). Properties of concrete with eggshell powder as cement replacement, *Indian Concrete Journal*, 88(10), 94–102.
- Yuan, H., Dangla, P., Chatellier, P., & Chaussadent, T. (2013). Degradation modelling of concrete submitted to sulfuric acid attack, *Cement and Concrete Research*, 53, 267–277.
- Zain, M. R. M., Oh, C. L., & Lee, S. W. (2021). Investigations on rheological and mechanical properties of self-compacting concrete (SCC) containing 0.6 µm eggshell as partial replacement of cement. *Construction and Building Materials*, 303, 124539. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124539>

Annexe

Annexe 02



مخبر الأشغال العمومية في جنوب
LABORATOIRE DES TRAVAUX PUBLICS DU SUD

FEUILLE DE PAILLASSE
QUALIFICATION DES FINES - ESSAIS AU BLEU DE METHYLENE
NF EN 933-9 : 2022

Structure	UG	N° Dossier	stage
Lieu de travail	SIDI	Échantillon	Sabot

Vérification des équipements (étalonnage, vérification et état)	Équipement	N° Inventaire ou N° série	Constat*	Valeur de correction**
	Thermomètre			
	Étuve			
	Balance			
	Tamis mm (0.125 ou 2)			
	Burette			
	Agitateur			
	Reference Solution 10g/l	N° PV	Date	
Réactifs (N° Lot)	Bleu.M poudre	Eau distillée		

Description de l'échantillon :

(*) : C= conforme, NC=non conforme.

(**) Important : Toutes les valeurs mentionnées doivent être corrigées par les valeurs de correction

N°	ETALE	EXIGENCE	VALEUR															
1	Date et Heure Début D'essai	23/02/2025	9h15															
2	Choisir la méthode de travail	<ul style="list-style-type: none"> Fraction 0/2 mm <input checked="" type="checkbox"/> Fraction 0/0.125 mm <input type="checkbox"/> 																
3	Réduire l'échantillon de laboratoire. Tamiser l'échantillon réduit.	<ul style="list-style-type: none"> Par division ou quartage Tamis 2 ou 0.125 mm Pour obtenir deux sous-échantillons ≥ 200 g 	Tamis = 02 mm M = 344.39 g M ₀ = 200 g															
5	Placer l'un des sous-échantillons tamisés « M » à l'étuve	<ul style="list-style-type: none"> À 110 °C ± 5 °C pour les matériaux non sensibles à la chaleur À 40 °C ± 5 °C pour les matériaux sensibles à la chaleur 	Tare : 21 Masse Tare : 119.72 Température d'étuvage : 110 °C Heure d'étuvage : 9h30															
6	Assurer que la masse constante « M » est atteinte et calculer la teneur en eau	<ul style="list-style-type: none"> La durée entre deux pesées successive (M_i et M_{i+1}) est au minimum 1 h $R = \frac{M_i - M_{i+1}}{M_i} \times 100 < 0.1 \%$ 	<table border="1"> <tr> <td>4 h</td> <td>h</td> <td>h</td> <td>h</td> <td>h</td> </tr> <tr> <td>344.16</td> <td>344.16</td> <td>344.16</td> <td>344.16</td> <td>344.16</td> </tr> <tr> <td>344.16</td> <td>344.16</td> <td>344.16</td> <td>344.16</td> <td>344.16</td> </tr> </table> R = 0.06 (%)	4 h	h	h	h	h	344.16	344.16	344.16	344.16	344.16	344.16	344.16	344.16	344.16	344.16
4 h	h	h	h	h														
344.16	344.16	344.16	344.16	344.16														
344.16	344.16	344.16	344.16	344.16														

		$\omega = \left[\frac{M - M'}{M'} \right] \times 100$	$M' = 344.16 \text{ g}$ $\omega = 0.07 \text{ (\%)}$
7	Verser (500 ± 5) ml d'eau distillée dans le b�cher et ajouter la prise d'essai « M_0 » dans le cas de la fraction 0/2 et ajouter la prise d'essai « M_{1F} » dans le cas de la fraction 0/0.125 et	<ul style="list-style-type: none"> En remuant bien avec la spatule $M_{1F} = 30 + (0.3 \times \omega)$ 	$M_{1F} / M_0 = 200 \text{ g}$
8	Agiter la solution colorée et remplir la burette de solution colorée		<input checked="" type="checkbox"/>
9	Mettre en marche l'agitateur et déclencher le minuteur.	<ul style="list-style-type: none"> Positionner les ailettes à environ 10 mm du fond du b�cher ; Agiter le contenu du b�cher pendant 5 min à (600 ± 60) tr/min ; Réduire la vitesse de l'agitateur à (400 ± 40) tr/min et agiter continuellement pendant la poursuite de l'essai. 	<input type="checkbox"/>
10	Test à la tache	<ul style="list-style-type: none"> Par dose de 5 ml avec 1 mn d'agitation ; Aur�ole persiste pendant 5 min (6 taches) Si l'auréole disparaît dans 4 minutes : ajouter une autre dose de 5 ml Si l'auréole disparaît dans la 5�me minute : ajouter une autre dose de 2 ml Si la quantité des fines est faible, ajouter la Kaolinite comme suite : <ul style="list-style-type: none"> $30,0 \pm 0,1 \text{ g}$ séchée à (110 ± 5) �C à masse constante ; V' ml de solution colorée dans le b�cher où <p style="text-align: center;">$V' = 30 \text{ ml}$</p> $M_1 = \frac{M_0}{1 + \left(\frac{\omega}{100} \right)}$ $MB = \frac{V_1 - V}{M_1} \times 10$ $MBF = \frac{V_1}{M_{1F}} \times 10$	$\omega = 0.07 \text{ (\%)}$ $M_{1F} / M_0 = 200 \text{ g}$ $V' = 1 \text{ ml}$ $V_1 = 10 \text{ ml}$ $M_1 = 199.86 \text{ g}$ $MB_{1F} = 0.50 \text{ g/kg}$ 0.05 g/100g
11	Date et heure de fin d'essai	27.10.2025 14h00	

Observation :

Nom et Prénom du Technicien : _____ Visa : _____

Nom et Prénom du Contrôleur : _____

Date : _____

Visa : _____

Contrôle et vérification	Oui	Non
Qualification du technicien		
Renseignement correct		
Vérification du matériel		
Calcul correct		

Annexe 03

FICHE TECHNIQUE

SILTEK POWDER

FUMÉE DE SILICE ACTIVE SÉLECTIONNÉE À HAUTE PURETÉ

01-18



DESCRIPTION

C'est un produit en poudre, constitué par une excellente silice active micronisée, communément appelée « fumée de silice ».

SILTEK POWDER par sa haute composition en silice et micro silicates actifs et par sa grande surface spécifique, est considéré, aujourd'hui, comme l'un des meilleurs produits à haute activité pouzzolane.

CARACTERISTIQUES

SILTEK POWDER est constitué de 93 à 98% de particules sphériques de SiO_2 amorphes avec des dimensions de quelques dixièmes de microns, c'est ainsi que sa surface spécifique s'élève à environ 220.000 cm^2/g (Blaine). Cette caractéristique lui permet de capter et de fixer l'hydrate de calcium $[\text{Ca}(\text{OH})]$ et de le transformer, en un premier temps, en silicate hydraté et successivement en silicate de calcium stable et irréversible.

Cette particularité permet de modifier le comportement des bétons à l'état humide, comme à l'état durci.

ACTION DE SILTEK POWDER

Pour obtenir une bonne maniabilité des bétons, il faut utiliser une quantité d'eau toujours supérieure à celle nécessaire pour l'hydratation du ciment.

Ce qui amène, à la pâte durcie, la formation de capillaires et cavités. Ces dernières sont d'autant nombreuses que la quantité d'eau est élevée.

En outre, durant la dilatation, il se forme une certaine quantité de chaux libre qui se dépose dans les cavités disponibles. Ce comportement rend vulnérable, par effet d'agents externes, le conglomérat durci, en réduisant la durée de vie.

SILTEK POWDER, ajouté au mélange, en raison de 2 à 5% du poids du ciment, capte et réagit avec la chaux libre, et remplit ainsi les vides présents dans la pâte cimentaire, ce qui rend plus compact, plus imperméable et plus résistant le conglomérat et par conséquent plus durable et avec un meilleur aspect.

MODE D'UTILISATION

SILTEK POWDER est principalement utilisé dans tous les bétons et les mortiers de hautes performances.

SILTEK POWDER est utilisé dans la préparation de :

- Coulis de protection.
- Coulis pour injection de consolidation.
- Coulis expansifs.
- Bétons et mortiers à haute résistance mécanique.
- Bétons et mortiers à haute imperméabilité.
- Bétons pré comprimés résistants à l'action chimique.
- Bétons et mortiers pour utilisation sous-marine, spécialement en milieu agressif.
- Mortiers thixotrope pour réfection et réparation.

Et dans toutes les configurations où il est demandé aux mortiers ou aux bétons des caractéristiques supérieures, telles que :

- Résistances mécaniques.
- Résistances chimiques.
- Résistances à l'usure et à l'abrasion.
- Imperméabilité.
- Stabilité et cohésion.
- Durabilité.

Il est aussi utilisé pour réduire le ressuage des bétons.

Page 1/2



Siège & Usine :
B.P. 203 Zone Industrielle de Sidi-Bel-Abbès
Tél. : + 213 (0) 48 70 34 63
Fax : + 213 (0) 48 70 34 62
E-mail : info@teknachem.com
WWW.TEKNACHEM.COM

Antenne d'Alger :
Rue de la Soummam lot N° 06 Z.I. Oued Smar Alger
Tél./Fax : + 213 (0) 23 92 05 62

Antenne de Sétif :
Zone d'Activité Artisanale 6^{ème} Tranche - Sétif
Tél. : + 213 (0) 36 93 90 10 - Fax : + 213 (0) 36 93 90 60

Les informations contenues dans la présente fiche technique, bien que représentant le stade le plus avancé de la connaissance, ne dispensent pas l'utilisateur de procéder à des tests préliminaires dans ses propres conditions d'emploi ou à faire appel à l'assistance technique de la société. Par conséquent **TEKNACHEM ALGERIE SARL** décline toutes responsabilités pour l'emploi inapproprié du produit.





SILTEK POWDER

FUMÉE DE SILICE ACTIVE SÉLECTIONNÉE À HAUTE PURETÉ



SILTEK POWDER est conseillé aussi, pour compléter et corriger la courbe granulométrique d'une composition de mélanges hydrauliques.

GRANULOMETRIE

Dans le **SILTEK POWDER** la dimension moyenne des particules est de 0,1 µm (micron). Les très petites dimensions des particules de cette poudre comportent une énorme surface spécifique, qui requiert une quantité d'eau supérieure. Alors pour optimiser l'efficacité du **SILTEK POWDER**, dans la production du béton, il est toujours conseillé l'emploi conjoint d'un super fluidifiant de la gamme **TEKNACHEM**.

DONNEES TECHNIQUES

Etat physique :Poudre
Couleur :Argent
Granulométrie :de 0,05 à 0,15 µm
Densité (g/cm³ à 20°C) :environ 0,3
Solubilité dans l'eau :Insoluble

COMPOSITION

SiO₂ :> 95 %
CaO :< 0,5 %
MgO :< 1 %
Fe₂O₃ :< 1 %
Al₂O₃ :< 0,5 %
Autres composants :des traces

DOSAGE

La marge de dosage moyenne est de 3 à 5 % du poids du ciment en fonction du mélange et des caractéristiques voulues.

D'autres dosages peuvent être utilisés, après des essais préliminaires.

CURE

Les réactions, en milieu pouzzolane, sont assez longues et arrivent dans un environnement humide. C'est pour cela, qu'il est demandé, une cure du mortier ou du béton, de manière à éviter des séchages trop rapides. Pour cela, il est conseillé de protéger les surfaces, durant la première phase de durcissement, avec des toiles de polyéthylène et d'appliquer, successivement sur les surfaces exposées une pellicule de **TEKCU-RING** surtout par temps chaud ou en présence de courants d'air.

CONDITIONNEMENT

SILTEK POWDER est disponible en :

- Big-bags de 500 kilogrammes.
- Sacs de 6 kilogrammes.

STOCKAGE ET VALIDITE

Stocké dans un endroit sec et dans les sacs d'emballage d'origine, parfaitement fermés, le **SILTEK POWDER** a une validité de 12 mois.

L'humidité, éventuellement absorbée par le produit, ne porte pas préjudice à son efficacité, mais rend difficile et peu précis son dosage, en plus d'une distribution non homogène du mélange fini. Il est, par conséquent, conseillé de refermer soigneusement les sacs après chaque prélèvement.



Siège & Usine :
B.P. 203 Zone Industrielle de Sidi-Bel-Abbès
Tél. : + 213 (0) 48 70 34 63
Fax : + 213 (0) 48 70 34 62
E-mail : info@teknachem.com
WWW.TEKNACHEM.COM

Antenne d'Alger :
Rue de la Soummam lot N° 06 Z.I. Oued Smar Alger
Tél./Fax : + 213 (0) 23 92 05 62

Antenne de Sétif :
Zone d'Activité Artisanale 6^{ème} Tranche - Sétif
Tél. : + 213 (0) 36 93 90 10 - Fax : + 213 (0) 36 93 90 60

Les informations contenues dans la présente fiche technique bien que représentant le stade le plus avancé de la connaissance, ne dispensent pas l'utilisateur de procéder à des tests préliminaires dans ses propres conditions d'emploi ou à faire appel à l'assistance technique de la société. Par conséquent la **TEKNACHEM ALGERIE SARL** décline toutes responsabilités pour l'emploi inapproprié du produit.



Annexe 04



50kg

ماتين MATINE

ALGÉRIE

LAFARGE
 Construire
 des villes meilleures™


Ciment portland au Calcaire

NA442 CEM II/B-L 42,5 N

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

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

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

AVANTAGES PRODUIT



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

 MEMBRE DE
HOLCIM

APPLICATIONS RECOMMANDÉES



- Construction des Ouvrages d'Art, infrastructure et superstructure pour bâtiments
- Préfabrication légère
- Béton de haute performance



FORMULATION CONSEILLÉE



	Ciment 	Sable (sec) 	Gravillons (sec) 	Eau (litres) 
		0/5	8/15mm 15/25mm	
Dosage pour béton c25/30	X 1 	+  X7	+  X5 +  X4	+ 25 L

Remarque: un bidon = 10 Litres

CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES



• Analyses chimiques

	Valeur
Perte au feu (%) (NA5042)	10.0±2
Teneur en sulfates (SO ₃) (%)	2.5±0.5
Teneur en oxyde de magnésium MgO (%)	Max 5%
Teneur en Chlorures(NA5042) (%)	< 0,1

• Composition minéralogique du Clinker (Bogue)

	Valeur
C3S (%)	60±3
C3A (%)	8±2

• Propriétés physiques

	Valeur
Consistance Normale (%)	26.5±2.0
Finesse suivant la méthode de Blaine (cm ² /g) (NA231)	3 700 - 5 200
Retrait à 28 jours (µm/m)	< 1 000
Expansion (mm)	≤ 3.0

• Temps de prise à 20° (NA 230)

	Valeur
Début de prise (min)	150±30
Fin de prise (min)	230±50

• Résistance à la compression

	Valeur
2 jours (MPa)	≥ 10.0
28 jours (MPa)	≥ 42.5

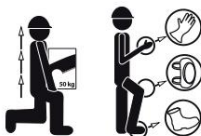
CONSIGNES DE SÉCURITÉ



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

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

MEMBRE DE
HOLCIM



Conditionnement:



LAFARGE ALGÉRIE

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

LAFARGE
لافارج

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

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

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



كلية العلوم و التكنولوجيا
قسم الري والهندسة المدنية

Université de Ghardaïa
Filière : Génie Civil
Spécialité : Structures.

Autorisation de dépôt d'un mémoire du Master

Les membres du jury	Nom et prénom	Signature
Le président de jury	MATALLAH Zineb	
Examineur	SAITI Issam	
Encadrante	DEHANE Sarra	

Je soussigné M^r/M^{me} : MATALLAH Zineb

Président(e) de jury des étudiants :

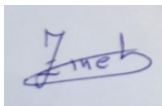
1. BOUHAMIDA Bouchra
2. SENISNA Imane

Thème

**Évaluation des propriétés de mortier incorporant de la poudre de coquilles
d'œufs comme substituant partiel du ciment**

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

Président de jury



الجامعة غرداية
قسم الري والهندسة المدنية
كلية العلوم و التكنولوجيا
رئيس قسم الري و الهندسة المدنية
الطبيب