

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Mémoire de Master

Présenté à l'Université de 8 Mai 1945 Guelma

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de : Génie Civil & Hydraulique

Spécialité : Génie Civil

Option : Structures

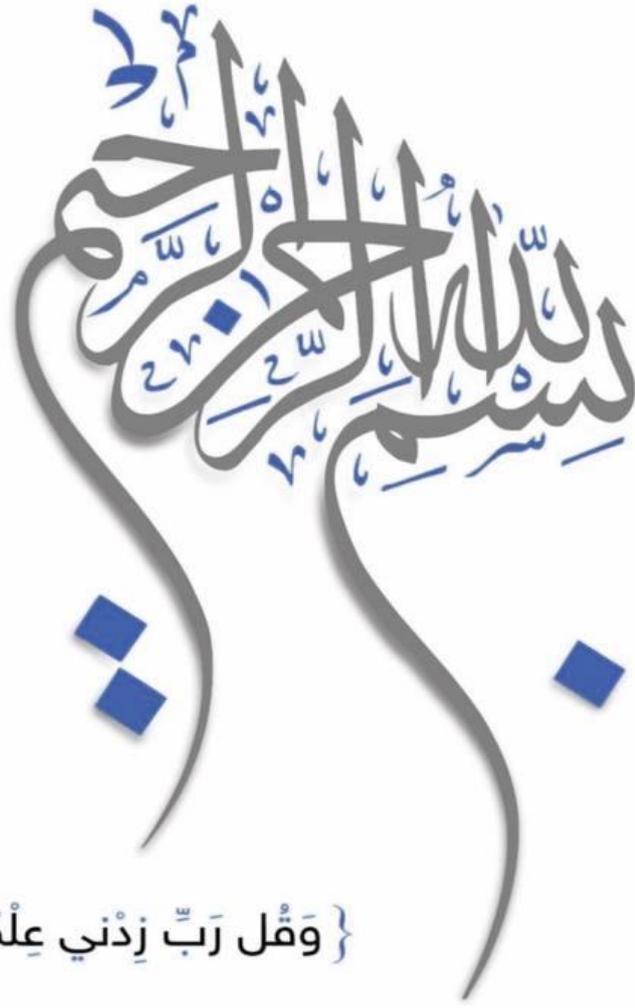
Présenté par :

MALLEM Dounia

**Thème : Valorisation des déchets Organiques et
inorganique dans la fabrication des matériaux cimentaire**

Sous la direction de : **Dr. Bouras Faouzi**

Jun 2024



{ وَقُلْ رَبِّ زِدْنِي عِلْمًا }

Remerciement

Dieu merci pour m'avoir donné la santé, la volonté et le courage sans les quels ce mémoire n'aurait pas été réalisé.

Ce travail a été effectué au sein du Laboratoire de génie civil et d'hydraulique, faculté des sciences et de la technologie de l'Université 8 mai 1945 de Guelma. Ainsi qu'au Laboratoire du control continu de cimenterie de Hdjar-soud Wilaya de Skikda.

Je remercie tout d'abord Monsieur **BOURAS Faouzi**, docteur à l'Université de Guelma, le promoteur de mon travail, pour avoir dirigé l'ensemble de mon travail, pour ses conseils avisés.

Mes remerciements vont également à Madame **NIGRI Ghania**, pour son soutien et son aide à la réalisation des travaux et des essais au niveau du laboratoire, à la recherche des solutions adaptées aux difficultés que j'ai rencontré au cours de la réalisation de ce modeste travail.

Je remercie les membres de jury d'avoir accepté de juger mon présent travail.

Je tiens également à exprimer mes plus vifs remerciements à Madame **KANNAT Samira**, technicienne du laboratoire pédagogique de ma faculté, pour leur aide, leur conseil, et pour tous les services qu'elle m'a offerts.

Mes remerciements à toute l'équipe du laboratoire de la cimenterie de Hadjar-soud, qui ont contribué à la réalisation de ce travail durant la période de mon stage.

Je remercie spécialement Monsieur **SID** qui m'a enrichi avec un précieux savoir qui est le meilleur héritage pour l'avenir, pour son aide à la réalisation des travaux ainsi pour son soutien moral et leur encouragement.

Je dis merci à ma chère famille surtout ma mère, mon père, mon frère et ma sœur la plus cher à mon cœur. Sans eux, je ne serais pas allé si loin.

Un grand merci aussi pour mes camarades mes amies et pour chaque personne qui a fait partie de rendre ce travail réel.

Finalement, j'adresse toute mon affection à moi-même d'être forte, courageuse et patiente.

Dédicace

Toutes les lettres ne sauraient trouver les mots qu'il faut...

Tous les mots ne sauraient exprimer la gratitude,

L'amour, le respect, la reconnaissance...

Aussi, c'est tout simplement que

Je dédie ce mémoire

À MES CHERS PARENTS

Aucune dédicace ne saurait exprimer mon respect, mon amour éternel et ma considération pour les sacrifices que vous avez consenti pour mon instruction et mon bien être.

Je vous remercie pour tout le soutien et l'amour que vous me portez depuis mon enfance et j'espère que votre bénédiction m'accompagne toujours.

Que ce modeste travail soit l'exaucement de vos vœux tant formulés, le fruit de vos innombrables sacrifices, bien que je ne vous en acquitte jamais assez.

Puisse Dieu, le Très Haut, vous accorder santé, bonheur et longue vie et faire en sorte que jamais je ne vous déçoive.

À CHERE ADORABLE SŒUR

Ma deuxième maman, Ibtissem

À MON CHER FRÈRE, Mohamed

En témoignage de mon affection fraternelle, de ma profonde tendresse et reconnaissance, je vous souhaite une vie pleine de bonheur et de succès et que Dieu, le tout puissant, vous protège et vous garde.

À TOUTES LES PERSONNES QUI ONT PARTICIPÉ A L'ÉLABORATION DE CE TRAVAIL À TOUS CEUX QUE J'AI OMIS DE CITER.



Résumé

RESUME

Dans ce travail de recherche, on vise à étudier la faisabilité de fabriquer un nouveau ciment composé, dans lequel une quantité de clinker est substituée par la cendre des grignons d'olive, de poudre de Gel de silice. Le taux de substitution volumique de ciment varie de 0 à 30% avec un pas de 10% pour la cendre des grignons d'olive et à de 0 à 7.5% avec un pas de 2.5% pour la poudre de Gel de Silice. Une élaboration des différents ciments aux ajouts sus-indiqués a été menée. Différents échantillons ont été prélevés des différents ciments élaborés et ce dans le but de suivre un protocole de caractérisation chimique, physique et mécanique selon les normes en vigueur.

D'après les résultats obtenus du point de vue composition chimique, physique et résistance mécanique, il se dégage de manière générale et non exhaustive, les ciments qui contient 10% de cendre des grignons d'olive et 2.5% de poudre de Gel de Silice réponds aux exigences de la norme en vigueur en Algérie NA 442.

Ces conclusions peuvent être conforter et examiner de manière plus rigoureuse et approfondie en examinant d'autres caractéristiques avec des études microscopiques afin de mieux maîtriser (comprendre) ces ajouts cimentaires.

Enfin une ébauche de fiche technique des ciments élaborés a été proposé en fin d'étude.

Mots clés : Valorisation, Ciment, Poudre de Gel de Silice, Cendre des grignons d'olive.

ملخص

في هذا العمل البحثي، الهدف هو دراسة جدوى صنع أسمنت مركب جديد، حيث يتم استبدال كمية من الكالينر برماد ثقل الزيتون ومسحوق هلام السيليكا. يتراوح معدل الاستبدال الحجمي من 0 إلى 30% بخطوة 10% لرماد ثقل الزيتون ومن 0 إلى 7.5% بخطوة 2.5% لمسحوق هلام السيليكا. تم وضع مختلف أنواع الأسمنت مع الإضافات المذكورة أعلاه. تم أخذ عينات مختلفة من أنواع الأسمنت المختلفة التي تم تطويرها من أجل اتباع بروتوكول توصيف كيميائي وفيزيائي وميكانيكي وفقا للمعايير المعمول بها.

وفقا للنتائج التي تم الحصول عليها من وجهة نظر التركيب الكيميائي والتركيب الفيزيائي والمقاومة الميكانيكية، فإن الأسمنت الذي يحتوي على 10% من رماد ثقل الزيتون و2.5% من مسحوق السيليكا جال يفي بشكل عام وليس شاملا بمتطلبات المعيار المعمول به NA 442 في الجزائر.

يمكن تعزيز هذه الاستنتاجات وفحصها بشكل أكثر دقة وشمولا من خلال فحص الميزات الأخرى بالدراسات المجهرية من أجل إتقان (فهم) هذه الإضافات الأسمنتية بشكل أفضل.

وأخيرا، تم اقتراح مشروع ورقة تقنية للأسمنت الذي تم تطويره في نهاية الدراسة.

الكلمات الدالة: تثمين، أسمنت، مسحوق هلام السيليكا، رماد ثقل الزيتون.

Abstract

In this research work, the aim is to study the feasibility of making a new compound cement, in which a quantity of clinker is substituted by the ash of olive pomace and silica gel powder. The substitution rate varies from 0 to 30% with a step of 10% for olive pomace ash and from 0 to 7.5% with a step of 2.5% for Silica Gel powder. An elaboration of the various cements with the above-mentioned additions was carried out. Various samples were taken from the different cements developed in order to follow a chemical, physical and mechanical characterization protocol according to the standards in force.

According to the results obtained from the point of view of chemical composition, physical composition and mechanical resistance, it is generally and not exhaustively that cements that contain 10% olive pomace ash and 2.5% Silica Gel powder meet the requirements of the standard in force in Algeria NA 442.

These conclusions can be reinforced and examined more rigorously and thoroughly by examining other features with microscopic studies in order to better master (understand) these cementitious additions.

Finally, a draft technical sheet of the cements developed was proposed at the end of the study.

Keywords: Valorization, Cement, Silica Gel Powder, Olive Pomace Ash.

Table des matières

Remerciement

Dédicace

Résumé

INTRODUCTION GENERALE.....1

CHAPITRE I : RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

Partie 1 : GENERALITE SUR LES CIMENTS

I.1	Introduction	3
I.1.1	Naissance de l'industrie cimentaire.....	4
I.2	Définition du ciment	4
I.3	Constituants du ciment	5
I.3.1	Constituants de base de ciment.....	5
I.4	Différents types et classifications des ciments	11
I.4.1	En fonction de leur composition	11
I.4.2	En fonction de leur résistance normale.....	13
I.5	Procédé de fabrication du ciment.....	14
I.5.1	Extraction des matières premières	14
I.5.2	Concassage.....	14
I.5.3	Broyage des matières premières	15
I.5.4	Préparation de la matière première	15
I.5.5	La cuisson.....	16
I.5.6	Refroidissement rapide du clinker	17
I.5.7	Broyage du clinker pour obtenir le ciment	17
I.5.8	Stockage, ensachage et expédition	17
I.6	Utilisation du ciment	17
I.7	Marché du ciment.....	19
I.7.1	La demande mondiale.....	19
I.7.2	Le coût de production	19
I.7.3	Marché du ciment en Algérie	19

Partie 2 : VALORISATION DES DECHETS ORGANIQUES ET INORGANIQUES
DANS LA FABRICATION DES MATERIAUX CIMENTAIRE

I.8	Introduction	22
I.9	Définition des déchets	22
I.10	Classification des déchets.....	23
I.10.1	Selon leur nature	23

I.10.2	Selon le mode de traitement et d'élimination	23
I.10.3	Selon l'origine	24
I.10.4	Selon le comportement et les effets sur l'environnement	25
I.11	Gestion des déchets	25
I.11.1	Réduction de la production à la source	25
I.11.2	Valorisation énergétique des déchets	26
I.11.3	Elimination de déchet	26
I.11.4	Recyclage ou valorisation des " sous-produits " de la fabrication	26
I.12	Déchets du grignon d'olive.....	26
I.12.1	Les grignons d'olives.....	27
I.12.2	Caractéristiques physiques du grignon d'olive	28
I.12.3	Composition chimique du grignon d'olive.....	28
I.12.4	Valorisation du grignon d'olive	29
I.13	Déchets de Gel de Silice.....	30
I.13.1	Définition de Gel de Silice	30
I.13.2	Structure et propriétés.....	31
I.13.3	Gel de Silice utilisation	31
I.13.4	Régénération de Gel de Silice.....	32
I.13.5	Le Gel de Silice au lieu de la fumée de silice dans la fabrication de ciment.....	33
I.14	Conclusion	33
CHAPITRE II : MATERIAUX ET PROCEDURES EXPERIMENTALES		
II	Introduction.....	34
II.1	Préparation des nouveaux ciments	34
II.1.1	Le ciment.....	34
II.1.2	Le grignon d'Olive	34
II.1.3	Le Gel de Silice	37
II.2	Caractérisation des ajouts utilisés.....	38
II.2.1	Cendre des grignons d'olive	38
II.2.2	Poudre de Gel de Silice	39
II.3	Formulation des différents ciments utilisés dans notre étude	40
II.4	Essais effectués.....	40
II.4.1	Préparation des mortiers normalisés	40
II.4.2	Essais de caractérisation chimique	41
II.4.3	Essais de caractérisations physiques	43

II.4.4	Essai sur mortier normalisé	47
II.4.5	Essais de caractérisations mécaniques	53
II.5	Conclusion	54
CHAPITRE III : CARACTERISATION DES CIMENTS ELABORES		
III	Introduction	55
III.1	Résultats des essais réalisés.....	55
III.1.1	Caractérisation des ciments élaborés	55
I.1.1.1	Caractérisation chimique	55
I.1.1.2	Caractérisation physique.....	58
I.1.1.3	Essai sur mortier normalisé.....	63
I.1.1.4	Caractérisations mécaniques.....	76
III.2	Conclusion	80
CONCLUSION GENERALE.....		81
Références bibliographiques.....		84

Liste des figures

Chapitre I

Figure I. 1: Vue aérienne d'une cimenterie 4

Figure I. 2: A) Nodules de clinker incandescent à la sortie du four, B) Nodules de clinker après refroidissement et avant broyage 6

Figure I. 3: Laitier moulu de haut fourneau 7

Figure I. 4: Roche de calcaire 9

Figure I. 5: Hall de préhomogénéisation du cru 16

Figure I. 6: Matière en fusion à l'intérieur d'un four de cimenterie 16

Figure I. 7: Les grandes étapes de la fabrication du ciment..... 17

Figure I. 8: Les différents composants du grignon d'olive. 28

Figure I. 9: Surface du Gel de Silice sec et hydraté 31

Figure I. 10: Perles de Gel de Silice..... 31

Chapitre II

Figure II. 1: Ciment CEM I – CEMI 42.5 utilisé dans les essais..... 34

Figure II. 2: A) Déchets d'huile d'olive, B) HUILERIE MEDDOUR-BOUAATI- Willaya de Guelma..... 35

Figure II. 3: Cendre du grignon d'olive..... 35

Figure II. 4: Etapes à suivre pour l'obtention des cendres du grignon d'olive..... 36

Figure II. 5: Grains de Gel de Silice obtenu à partir de déchets des médicaments et sacs d'emballage des chaussures et vêtements 37

Figure II. 6: Poudre de Gel de Silice..... 37

Figure II. 7: Etape à suivre pour préparer la poudre de silice. 38

Figure II. 8: Essai masse volumique absolue de la cendre..... 39

Figure II. 9: A) Malaxeur pour la préparation du mortier normalisé, B) Table vibratoire. 41

Figure II. 10: Four de calcination pour PAF..... 42

Figure II. 11: Spectromètre à Fluorescence X. 42

Figure II. 12: Essai de la teneur en CaO libre. 43

Figure II. 13: Masse volumique absolue d'un échantillon des ciments élaborés..... 43

Figure II. 14: Masse volumique apparente des ciments anhydres. 44

Figure II. 15: La finesse par tamisage..... 45

Figure II. 16: Appareil de Blaine (SSB). 45

Figure II. 17: Appareil de Vicat 46

Figure II. 18: Prismètre (Vicat automatique)..... 47

Figure II. 19: Masse volumique apparente à l'état frais du mortier. 47

Figure II. 20: Tests d'étalement. 48

Figure II. 21: Conservation des éprouvettes a l'eau potable. 49

Figure II. 22: Balance hydrostatique.....	51
Figure II. 23: Schéma du dispositif expérimental.	52
Figure II. 24: Essai d'absorption d'eau par capillarité.....	52
Figure II. 25: Conservation des éprouvettes dans l'eau distillée et Acide et l'acide sulfurique.....	53
Figure II. 26: Appareil flexion-compression	54

Chapitre III

Figure III. 1; a : Variation de la consistance en fonction du pourcentage de la cendre des grignons d'olive/ b : Variation de la consistance en fonction du pourcentage de la poudre de Gel de Silice	61
Figure III. 2: a : Résultats de temps de prise des ciments élaborés à base de cendre des grignons d'olive / b : Résultats de temps de prise des ciments élaborés à base de la poudre de Gel de Silice	63
Figure III. 3: a : Masse volumique apparente des mortiers des ciments à base de la cendre des grignons d'olive / b : Masse volumique apparente des mortiers des ciments à base de la poudre de Gel de Silice.....	64
Figure III. 4: a : Valeurs d'étalement des mortiers étudiés à base de la cendre des grignons d'olive / b : Valeurs d'étalement des mortiers étudiés à base de la poudre de Gel de Silice	66
Figure III. 5: a : Valeurs de l'absorption par immersion totale pour les mortiers formuler des ciments de la cendre des grignons d'olive / b : Valeurs de l'absorption par immersion totale pour les mortiers formuler des ciments de la poudre de Gel de Silice.....	67
Figure III. 6: a : Valeurs de porosité accessible à l'eau des ciments à base de cendre des grignons d'olive / b : Valeurs de porosité accessible à l'eau des ciments à base de poudre de Gel de Silice	69
Figure III. 7: Variation de l'absorption capillaire en fonction du temps des mortiers de ciments de cendre après 28 et 60 jours.....	70
Figure III. 8: Variation de l'absorption capillaire en fonction du temps des mortiers de ciments de la poudre après 28 et 60 jours.....	71
Figure III. 9: la perte en masse des mortiers de ciment de cendre conservé dans l'acide	73
Figure III. 10: Gain en masse des mortiers de ciment de cendre conservé dans l'eau.....	74
Figure III. 11: la perte en masse des mortiers de ciment de Gel de Silice conservé dans l'acide.....	75
Figure III. 12: Gain en masse des mortiers de ciment de Gel de Silice conservé dans l'eau	76
Figure III. 13: Résistance à la compression des mortiers de ciments à base de cendre des grignons d'olive.....	77
Figure III. 14: Résistance à la compression des mortiers de ciments à base de la poudre de Gel de Silice	78

Figure III. 15: Résistance à la flexion des mortiers de ciments à base de cendre des grignons d'olive.....	79
Figure III. 16: Résistance à la flexion des mortiers de ciments à base de la poudre de Gel de Silice	80

Liste des tableaux

Chapitre I

Tableau I. 1: Désignation des différents types de ciment en fonction de leur composition [20]..... 13

Tableau I. 2: Spécification et valeurs garanties en fonction de la classe 14

Tableau I. 3: Cimenteries Algériennes et l'utilisation des ajouts21

Tableau I. 4: Répartition mondiale des oliviers et surfaces cultivées correspondantes.....27

Tableau I. 5: Composition chimique indicative des différents types de grignon d'olive...29

Chapitre II

Tableau II. 1: Composition chimique de la cendre des grignons d'olive38

Tableau II. 2: Propriétés physiques de la cendre des grignons d'olive.....39

Tableau II. 3: Propriétés physiques de la poudre de Gel de Silice.....39

Tableau II. 4 : a) Désignation et dosage des ciments élaborés de la cendre d'olive. B) Désignation et dosage des ciments élaborés du Gel de Silice.....40

Tableau II. 5: Malaxage d'un mortier normal.....41

Tableau II. 6: Valeurs d'étalement49

Tableau II. 7: Limite de temps.....54

Chapitre III

Tableau III. 1: -a Teneur en oxyde des échantillons de cendre d'olive (teneur moyenne en masse) / b -Teneur en oxyde des échantillons de Gel de Silice.....56

Tableau III. 2: a : Teneur en (CaO) libre et en PAF des échantillons de cendre d'olive / b : Teneur en (CaO) libre et en PAF des échantillons de Gel de Silice.....57

Tableau III. 3: a : Indice d'hydraulicité des ciments élaborés à base de cendre des grignons d'olive/ b : Indice d'hydraulicité des ciments élaborés à base de Gel de Silice ..58

Tableau III. 4 : a : Masses volumiques des ciments élaborés à base de cendre des grignons d'olive / b : Masses volumiques des ciments élaborés à base de la poudre de Gel de Silice59

Tableau III. 5: a : La finesse des ciments élaborés à base de cendre des grignons d'olive/ b : La finesse des ciments élaborés à base de Gel de Silice.....59

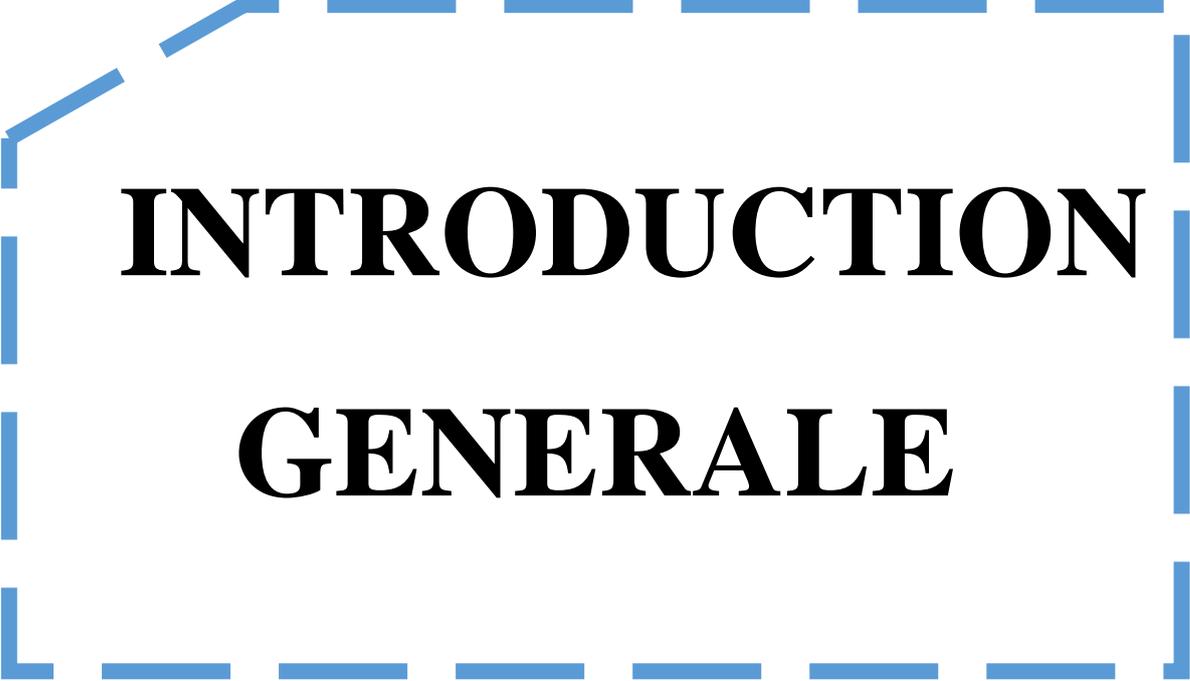
Tableau III. 6: a : Surface spécifique de Blaine des échantillons de cendre des grignons d'olive / b : Surface spécifique de Blaine des échantillons de Gel de Silice.....60

Tableau III. 7: a : Consistance normale des ciments élaborés à base de cendre des grignons d'olive / b : Consistance normale des ciments élaborés à base de Gel de Silice..61

Tableau III. 8: a : Temps de prise des ciments élaborés à base de cendre des grignons d'olive / b : Temps de prise des ciments élaborés à base de poudre de Gel de Silice62

Tableau III. 9: a : Masse volumique apparente des mortiers des ciments à base de la cendre à l'état frais et à l'état durci / b : Masse volumique apparente des mortiers des ciments à base de la poudre à l'état frais et à l'état durci64

Tableau III. 10: a : Test d'étalement des mortiers normalisés de ciments contient la cendre des grignons d'olive / b : Test d'étalement des mortiers normalisés de ciments contient la poudre de Gel de Silice	65
Tableau III. 11: a : Valeurs de l'absorption par immersion totale des échantillons de cendre des grignons d'olive / b : Valeurs de l'absorption par immersion totale des échantillons de poudre de Gel de Silice.....	67
Tableau III. 12: a : Porosité accessible à l'eau des ciments élaborés à base de cendre des grignons d'olive en (%) / b : Porosité accessible à l'eau des ciments élaborés à base de poudre de Gel de Silice en (%).....	68
Tableau III. 13: Absorption capillaire des mortiers de ciments de cendre après 28 et 60 jours.....	70
Tableau III. 14: Absorption capillaire des mortiers de ciments de poudre après 28 et 60 jours.....	71
Tableau III. 15: Valeurs de la perte en masse des mortiers de ciment de cendre conservé dans l'acide.....	72
Tableau III. 16: Gain en masse des mortiers de ciment de cendre conservé dans l'eauGain en masse des mortiers de ciment de cendre conservé dans l'eau	73
Tableau III. 17: Valeurs de la perte en masse des mortiers de ciment de Gel de Silice conservé dans l'acide.....	74
Tableau III. 18: Valeurs de la variation en masse des mortiers de ciment de Gel de Silice conservé dans l'eau	75
Tableau III. 19: Résistance à la compression des mortiers de ciments à base de cendre	76
Tableau III. 20: Résistance à la compression des mortiers de ciments à base de la poudre de Gel de Silice	77
Tableau III. 21: Résistance à la flexion des mortiers de ciments à base de cendre.....	78
Tableau III. 22: Résistance à la flexion des mortiers de ciments à base de poudre de Gel de Silice	79



INTRODUCTION
GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Dans un contexte mondial marqué par une préoccupation croissante pour la durabilité et la gestion des déchets, l'innovation dans le secteur des matériaux de construction est devenue cruciale. Parmi les approches prometteuses, la valorisation des sous-produits industriels et agricoles pour la fabrication de nouveaux ciments présente un intérêt particulier. Ce mémoire se penche sur l'utilisation des grignons d'olive et du Gel de Silice comme composants alternatifs dans la production de ciments.

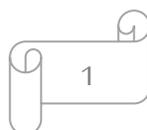
Les grignons d'olive, résidus issus de l'extraction de l'huile d'olive, et les sachets de Gel de Silice, utilisés couramment comme agents déshydratants, constituent des déchets abondants dont l'élimination pose des défis environnementaux. La transformation de ces déchets en ressources pour l'industrie du ciment pourrait non seulement atténuer leur impact environnemental, mais aussi contribuer à la fabrication de ciments plus performants et plus écologiques.

Ce travail se propose d'explorer les propriétés physico-chimiques des cendres de grignons d'olive et de poudre de Gel de Silice, ainsi que leur impact sur les caractéristiques mécaniques et durabilité des ciments produits. En intégrant ces matériaux dans le processus de fabrication du ciment, nous espérons démontrer leur potentiel à améliorer les performances des ciments tout en réduisant l'empreinte écologique de l'industrie.

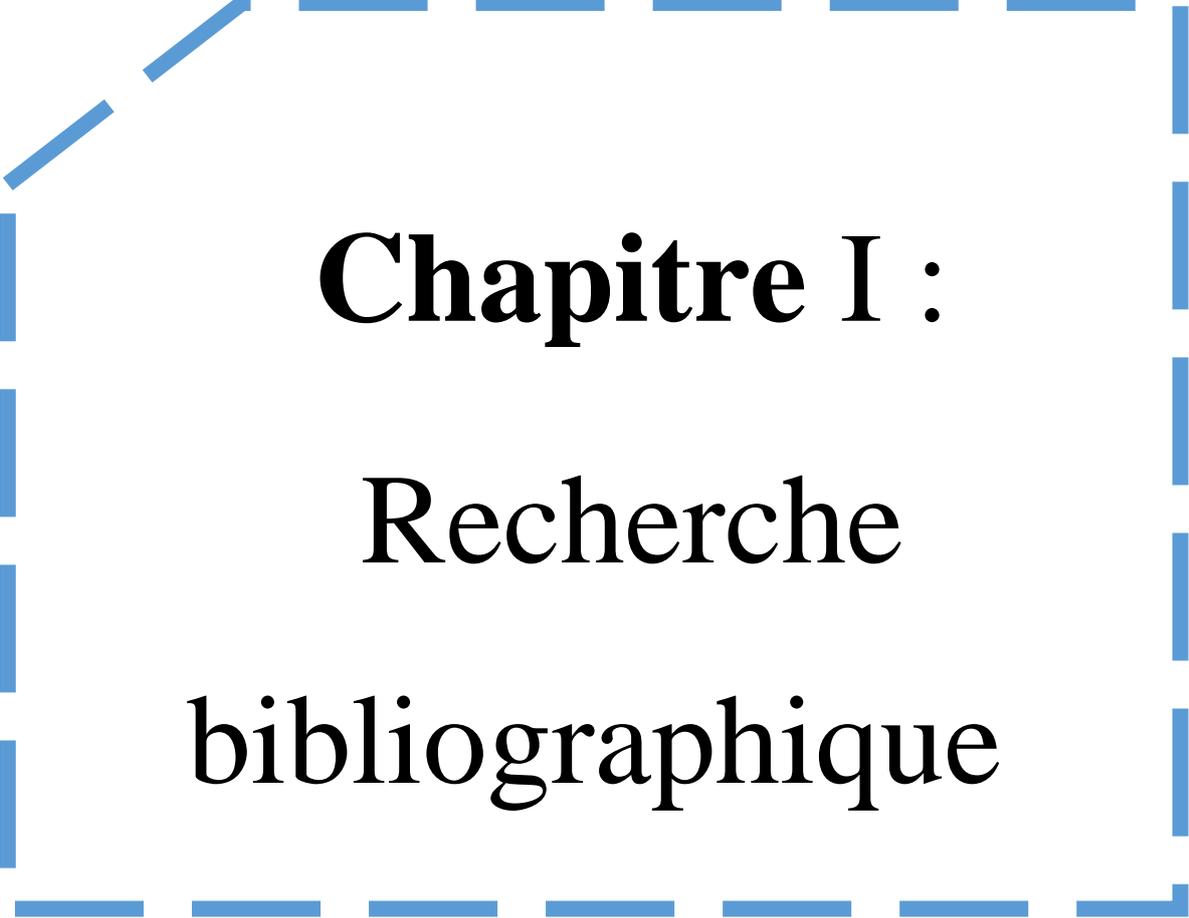
D'autre part, l'intégration de ces matériaux dans la production de ciment s'inscrit dans une démarche d'économie circulaire, où les déchets sont réutilisés comme matières premières, contribuant ainsi à la réduction de l'exploitation des ressources naturelles et des émissions de CO₂ associées à la production de ciment traditionnel.

La première partie de ce mémoire abordera une revue de littérature sur l'utilisation des déchets industriels et agricoles dans l'industrie du ciment, en mettant en avant les avantages environnementaux et techniques de ces pratiques. La deuxième partie présentera la méthodologie utilisée pour la caractérisation des cendres de grignons d'olive et de la poudre de Gel de Silice, ainsi que les procédés de fabrication des ciments incorporant ces matériaux. Enfin, la troisième partie discutera des résultats obtenus et des perspectives d'amélioration et d'application de ces nouveaux ciments.

En conclusion, ce mémoire vise à apporter une contribution significative à la valorisation des déchets et à l'innovation dans l'industrie des matériaux de construction. La valorisation des



Les cendres de grignons d'olive et de la poudre de Gel de Silice représentent une opportunité prometteuse pour développer des ciments plus durables, répondant aux défis environnementaux et économiques actuels. Nous espérons que cette recherche encouragera davantage d'investigations et d'applications dans ce domaine, ouvrant la voie à une industrie du ciment plus verte et plus responsable.



Chapitre I :
Recherche
bibliographique

Partie 1**GENERALITES SUR LES CIMENTS****I.1 Introduction**

Depuis les premiers feux de camp des hommes préhistoriques jusqu'aux technologies avancées d'aujourd'hui, l'histoire du ciment est une saga fascinante qui s'étend sur des millénaires. L'humanité a toujours cherché des moyens de construire des abris plus durables et solides, et cette quête a conduit à des découvertes et des innovations majeures dans le domaine des matériaux de construction. Au fil du temps, des civilisations anciennes ont expérimenté avec différents liants et techniques de construction, jetant ainsi les bases de l'industrie cimentière telle que nous la connaissons aujourd'hui.

Ce récit captivant commence avec les premières tentatives des hommes préhistoriques pour ériger des structures rudimentaires, puis nous emmène à travers les découvertes clés des anciennes civilisations comme les Égyptiens et les Romains, qui ont introduit des techniques révolutionnaires dans la fabrication des liants hydrauliques. Cependant, malgré ces avancées initiales, la technologie du ciment a été largement oubliée jusqu'au 18e siècle, où des esprits curieux comme John Smeaton et Louis Vicat ont ravivé l'intérêt pour ces matériaux de construction essentiels.

À vrai dire, c'était une très longue histoire qui a duré des millénaires. Si les premiers hommes s'abritaient dans les grottes ou les cavernes, l'homme préhistorique bâtissait déjà de vastes huttes avec des murs en torchis supportés par une architecture en bois.

L'argile qui durcit en séchant est, très probablement, le premier liant utilisé par l'homme, mais le caractère réversible de ses propriétés qui rend très sensible à l'eau les torchis obtenus a dû être l'un des premiers casse-tête de nos lointains ancêtres.

Vers le 4e millénaire avant notre ère, les égyptiens gâchaient à l'eau le premier véritable liant minéral un plâtre grossier obtenu par calcination du gypse.

Plus tard, les grecs, puis les romains furent, sans doute, les premiers à fabriquer des liants hydrauliques susceptibles de durcir sous l'eau. Pour cela, ils mélangeaient de la chaux vive CaO, obtenue par cuisson de calcaire, et des cendres volcaniques de la région de Pouzzoles. C'est de là qu'est venu le terme bien connu de « pouzzolanique », qui se dit d'un matériau able, en présence d'eau, de fixer la chaux.

I.1.1 Naissance de l'industrie cimentaire

La première usine de ciment a été créée par Dupont et Demarle en 1846 à Boulogne-sur-Mer. Le développement n'a pu se faire que grâce à l'apparition de matériel nouveau four rotatif et broyeur à boulets, en particulier. Les procédés de fabrication se perfectionnèrent sans cesse. En 1870, pour produire une tonne de clinker (constituant de base du ciment), il fallait 40 heures [1].



Figure I. 1: Vue aérienne d'une cimenterie

I.2 Définition du ciment

Le mot « ciment » vient du latin “coementum”, qui signifie mortier, liant des maçonneries. L'intention étymologique de ce mot est donc plus ou moins conservée.

Le ciment est un liant hydraulique, c'est-à-dire que mélangé à l'eau il forme une pâte qui fait prise et durcit (propriétés hydrauliques).

En général le ciment est fabriqué par la cuisson des mélanges de calcaire et d'argile vers 1450°C, on obtient alors des nodules durs, appelés clinkers ; c'est en broyant très finement ceux-ci, additionnés d'un peu de gypse, qu'on produit le ciment Portland. D'autres types peuvent être obtenus en mélangeant ce clinker broyé avec des constituants, broyés également, qui présentent des propriétés hydrauliques ou pouzzolaniques : ce sont soit des laitiers de hauts fourneaux granulés, soit des cendres volantes ou encore des pouzzolanes, naturelles ou artificielles.

La principale utilisation du ciment est le béton, dont il est le composant actif, mais il entre aussi dans la composition des mortiers pour maçonneries ou pour enduits [2].

I.3 Constituants du ciment

I.3.1 Constituants de base de ciment

I.3.1.1 Clinker

Le clinker est le constituant principal hydraulique des ciments courants, il est obtenu par cuisson, ou clinkérisation à une température d'environ 1 450 °C, d'un mélange de matières premières, composé d'environ 80% de calcaire (CaCO_3 qui apporte l'oxyde de calcium, CaO) et 20% d'aluminosilicates (essentiellement des argiles : phyllosilicates) qui apportent les oxydes de silicium (SiO_2), d'aluminium (Al_2O_3) et de fer (FeO et Fe_2O_3) [3].

Le clinker se présente sous la forme de nodules durs et cristallisés, de teinte gris foncé pour les ciments habituels et verte pour le clinker de ciment blanc. Les principaux composants anhydres obtenus lors du refroidissement rapide du clinker sont :

- C_3S : Silicate tricalcique ($\text{SiO}_2 - 3 \text{CaO}$) : 50 à 65% (Alite).
- C_2S : Silicate bicalcique ($\text{SiO}_2 - 2 \text{CaO}$) : 15 à 20% (Bélite).
- C_3A : Aluminate tricalcique ($\text{Al}_2\text{O}_3 - 3\text{CaO}$) : 5 à 15% (Aluminate).
- C_4AF : Ferro-aluminate tétra calcique ($\text{Al}_2\text{O}_3 \text{Fe}_2\text{O}_3 - 4 \text{CaO}$) : 5 à 10% (Ferrite).

Le clinker contient encore en faibles quantités, sous forme de solution solide ou pris dans des combinaisons complexes, des alcalis (Na_2O , K_2O), de la magnésie (MgO), diverses traces de métaux.

On peut distinguer la structure minéralogique du clinker en trois phases [1] :

- **A** = alite (phase cristallisée), se présente sous la forme de cristaux polygonaux assez grands (grains anguleux foncés) de l'ordre de 50μ .
- **B** = bélite (phase vitreuse), se trouve sous forme impure dans le clinker (grains légèrement arrondis et rayés).
- **C** = célite (phase vitreuse légèrement foncée et claire), se trouve dans le clinker sous forme impure et de phase vitreuse [4].

La composition minéralogique des phases du clinker obtenu après cuisson des matières premières crues (raw materials en anglais) est fonction de la composition du mélange, de la température, du combustible utilisé, du temps de cuisson et des conditions de refroidissement du clinker (trempe rapide du clinker à l'air pour le solidifier avant que le C_3S

(alite, la phase la plus recherchée du clinker) n'ait eu le temps de se convertir en C2S (bélite) [5].

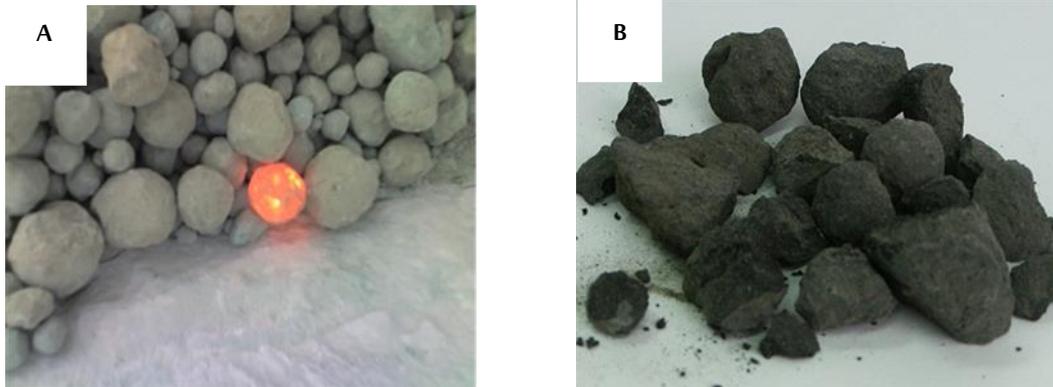


Figure I. 2: A) Nodules de clinker incandescent à la sortie du four/B) Nodules de clinker après refroidissement et avant broyage [5]

I.3.1.2 Le gypse (CaSO_4)

Le gypse ($\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$) ralentit la prise du ciment. Il réagit énergiquement avec l'hydroaluminat tricalcique et produit un sel insoluble d'hydrosulfoaluminat de calcium ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 31\text{H}_2\text{O}$). La quantité à introduire doit correspondre à la teneur en C3A dans le liant et lorsque cette teneur en gypse est respectée, l'action des hydroaluminats de calcium se trouve paralysée au moment initial [6].

Remarque : Le ciment portland est composé de clinker moulu auquel on ajoute une quantité de gypse.

I.3.1.3 Les constituants secondaires (Les ajouts)

I.3.1.3.1 Définition des ajouts

Les ajouts cimentaires sont des matériaux qui, combinés au ciment portland, contribuent aux propriétés du béton durci par action hydraulique ou pouzzolanique ou les deux à la fois. Les pouzzolanes naturelles, les cendres volantes, le laitier de haut fourneau granulé broyé et les fumées de silice sont des exemples courants une pouzzolane est un matériau siliceux ou aluminosiliceux qui, finement divisé et en présence d'humidité, réagit chimiquement avec l'hydroxyde de calcium libéré par l'hydratation du ciment portland pour former des composés possédant des propriétés liantes [7].

I.3.1.3.2 Type des ajouts

I.3.1.3.2.1 Le laitier de haut fourneau (L)

Appelé aussi le laitier broyé est un sous-produit de l'industrie sidérurgique lors de la fabrication de la fonte dans les hauts fourneaux, les laitiers sont formés de constituants non ferreux, des fondants et des cendres de coke. Leur composition en oxydes de calcium dans des proportions de l'ordre de 40 à 50 %, de la silice entre 25 à 35%, de l'alumine entre 12 à 30% ainsi que la magnésie et d'autres oxydes en très faibles quantités, tous ces éléments étant pratiquement les mêmes que ceux du clinker, leur structure vitreuse obtenue par trempe à l'eau leur confère des propriétés hydrauliques latentes, ce qui permet d'envisager leur utilisation en tant qu'ajout dans les ciments [8].

En Algérie c'est principalement l'usine sidérurgique d'El hadjar qui fournit le laitier granulé aux cimenteries.



Figure I. 3: Laitier moulu de haut fourneau [8]

I.3.1.3.2.2 Les cendres volantes [9]

Parfois dénommée PFA « pulverised fuel ash » en anglais ; sont des matériaux minéraux finement divisés, issus de la précipitation électrostatique ou mécanique de particules minérales contenues dans les fumées des chaudières alimentées au charbon pulvérisé. Ce sont des poudres fines constituées de particules vitreuses, de formes sphériques, dérivées de combustibles pulvérisés, ayant des propriétés pouzzolaniques.

Selon la norme européenne EN 197-1 (2012), on considère deux types standards des cendres volantes :

- **Les cendres volantes siliceuses (V)**

Elles présentent des propriétés pouzzolaniques et sont constituées de silice réactive entre 40 et 55 % proportion qui ne doit jamais inférieure à 25 % (en masse) et d'alumine entre

20 et 53 % et la proportion de CaO réactive doit être inférieure à 5 % de CaO réactive d'après Dreux et Festa et au plus 10 % CaO réactive d'après Tokyay.

• Les cendres volantes calciques (W)

Qui ont des propriétés hydrauliques et parfois pouzzolaniques. Ce sont souvent moins utilisées, la teneur en silice réactive ne doit pas être inférieure à 25 % et doivent contenir plus de 10 % de CaO et d'après Dreux et Festa plus de 5 % de CaO réactives.

I.3.1.3.2.3 Fumée de silice (D)

La fumée de silice est un sous-produit de l'industrie du silicium et des alliages de Ferro silicium. Ces produits sont fabriqués dans un four à arc, en réduisant le quartz par un apport approprié de carbone, à une température d'environ 2 000 °C. La fumée de silice est extraite en surface du four de réduction par des ventilateurs principaux et résulte de la condensation du gaz SiO. La fumée de silice est initialement produite sous forme de poudre grise, non-densifiée et principalement composée de particules ultrafines. Ces particules contiennent au moins 85 à 98% de silice SiO₂ amorphe et se présentent sous la forme de microsphères vitreuses dont le diamètre moyen se situe entre 0.1 et 0.2 µm, Leur surface spécifique varie entre 13 000 et 30000 m²/kg, et leur densité se situe entre 2.00 et 2.25.

La fumée de silice constitue un produit hautement pouzzolanique, fréquemment utilisé pour la fabrication des bétons à ultra hautes performances [3].

I.3.1.3.2.4 Schistes calcinés (T)

Ils sont produits dans un four à 800°C, les schistes ont des propriétés hydrauliques et pouzzalaniques. Ils contiennent des phases de clinker, des petites quantités de chaux libres (CaO), des sulfates de calcium et des oxydes en quantité plus importantes. Ils ont de fortes propriétés hydrauliques pouzzolaniques.

Les schistes calcinés, finalement broyés, doivent avoir une résistance à la compression d'au moins 25Mpa à 28 jours. Leurs expansions doivent être inférieures à 10mm en utilisant un mélange de 30% en masse de schistes calcinés broyés et de 70% en masse de ciment de référence [10].

I.3.1.3.2.5 Les calcaires

Les calcaires sont obtenus par broyage fin des roches naturelles, les calcaires doivent satisfaire aux spécifications suivantes [11] :

- Teneur en calcaire : $\text{CaCO}_3 \geq 75\%$ en masse.
- Teneur en carbone organique (TOC) respectivement de 0,5 % et 0,2 % en masse.



Figure I. 4: Roche de calcaire

I.3.1.3.2.6 Sulfate de calcium

Le sulfate de calcium est ajouté aux autres constituants du ciment au cours de sa fabrication pour réguler la prise (de 3 à 5% du poids du ciment). C'est en général du gypse (sulfate de calcium hydraté $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), de l'anhydrite (sulfate de calcium anhydre CaSO_4) ou de l'hémi hydrate ($\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O}$) [11].

Le pourcentage optimal de gypse croit en fonction de [12] :

- La teneur en alcalis, car l'addition du gypse neutralise l'action des alcalis.
- La teneur en C_3A et de sa réactivité.
- La finesse de mouture.

I.3.1.3.2.7 Fillers

Ce sont des Produits obtenus par broyage fin ou par pulvérisation de certaines roches (calcaire, basalte, laitiers, kieselguhr, bentonite, cendres volantes ...) naturelles ou non, agissant principalement, grâce à une granularité appropriée, par leurs propriétés physiques sur certaines qualités du ciment (accroissement de maniabilité, diminution de perméabilité et de capillarité, réduction de la fissurabilité ...). Ils ne peuvent jamais excéder 5 % en masse dans la composition du ciment [13].

I.3.1.3.2.8 Constituants mineurs du ciment

Les oxydes mineurs les plus importants dans le ciment sont [3] :

- L'oxyde de magnésium (MgO) provient de la dolomite, proviennent du calcaire.
- Les oxydes alcalins K_2O et Na_2O proviennent de l'argile et des feldspaths.

- L'anhydride sulfurique (SO_3) dans le clinker provient de la pyrite, du calcaire ou de L'argile et surtout des combustibles utilisés tels que le charbon, le fuel ou de gaz nature.

I.3.1.3.3 Avantages des ajouts minéraux

I.3.1.3.3.1 Avantages techniques

Les ajouts cimentaires améliorent généralement la résistance, l'imperméabilité et la ténacité aux attaques chimiques. Enfin, parce qu'ils permettent une moindre chaleur d'hydratation des ciments mélangés, les ajouts cimentaires améliorent la résistance à la fissuration [14].

I.3.1.3.3.2 Avantages économiques

Le ciment Portland est le composant le plus coûteux, puisqu'il est un matériau à forte intensité d'énergie. La plupart des matériaux susceptibles de remplacer le ciment dans le mortier ou béton sont des sous-produits, ils demandent relativement moins d'énergie, sinon aucune, lors de la substitution, et sont beaucoup moins coûteux que le ciment Portland [14].

I.3.1.3.3.3 Avantages écologiques (émission de gaz à effet de serre)

La production d'une tonne de ciment Portland libère dans l'atmosphère une quantité quasi équivalente de gaz carbonique (CO_2) (1 tonne du ciment \approx 1 tonne du CO_2). De fait, le remplacement du ciment Portland par des ajouts cimentaires réduit d'autant les émissions de (CO_2).

Par exemple, la production d'une tonne de ciment géopolymère à base de kaolin ne génère pas plus que 0,180 tonnes de CO_2 provenant de la combustion de carbone, comparé à un ton de CO_2 pour les ciments Portland [15].

I.3.1.3.4 Importance des ajouts [16]

- Rendent le mélange plus fluide ce qui permet de diminuer la quantité d'eau ;
- L'hydratation du ciment portland libère une grande quantité de chaux à la suite de la réaction de l'hydratation du C_3S et C_2S (30% de la masse du ciment) qui contribue peu à la résistance de la pâte cimentaire hydratée. Elle peut même être responsable de problème de durabilité puisqu'elle peut être assez facilement lessivée par de l'eau. Les ajouts cimentaires (actifs) réagissent avec cette chaux libérée pour donner des C-S-H, véritable liant contribuant à l'augmentation des résistances mécaniques du matériau.

I.4 Différents types et classifications des ciments [17]

I.4.1 En fonction de leur composition

Selon que des constituants, autres que le gypse, sont ou non ajoutés au clinker lors des opérations de fabrication, on obtient les différents types de ciments définis par la norme ciment (norme NF EN 197-1) :

- **CEM I (Ciment Portland Artificiel CEMI)**

Il contient au moins 95% de clinker et au plus 5% de constituants secondaires.

- **CEM II/A ou B (Ciment Portland Composé CPJ)**

Il contient au moins 65% de clinker et au plus 35% d'autres constituants : laitier de haut fourneau, fumée de silice, pouzzolane, cendres volantes, calcaires, constituants secondaires.

- **CEM III (Ciment de Haut Fourneau CHF)**

Il contient les classes suivantes :

- CEM III/A ou B : contient entre 36 et 80% de laitier et 20 à 64% de clinker.
- CEM III/C : contient au moins 81% de laitier et 5 à 19% de clinker.

- **CEM IV/A ou B (Ciment Pouzzolanique CPZ)**

Il contient 45 à 89% de clinker et 11 à 55% de pouzzolanes.

- **CEM V/A ou B (Ciment au Laitier et aux Cendres CLC)**

Il contient 20 à 64% de clinker, 18 à 49% de laitier et 18 à 49% de cendres volantes ou de pouzzolanes.

- **Autres types de ciments [18]**

- **Ciment blanc**

Les ciments blancs sont des ciments Portland de composition chimique très proche de celle des ciments gris. Leur blancheur provient d'une très faible teneur en oxydes métalliques (fer, manganèse, chrome). Leur fabrication demande la sélection de matières premières très pures.

- **Ciment à maçonner**

Ce ciment présente les mêmes éléments actifs que le ciment classique Portland, des propriétés et comportements analogues, mais des résistances moins élevées.

- **Ciment prompt (ciment naturel prompt)**

Ce ciment à prise rapide et à durcissement rapide, résulte de la cuisson à température modérée d'un calcaire argileux, suivie d'un broyage très fin.

- **Ciment alumineux fondu**

Ce ciment est obtenu par fusion d'un mélange de bauxite et de calcaire. Ce ciment durcissant rapidement, permet l'obtention d'une résistance élevée en quelques heures. Il présente également un bon comportement à la chaleur et aux milieux agressifs.

- **Ciments résistants aux sulfates (C.R. S)**

La teneur en C_3S ne doit pas dépasser 50%, celle du C_3A 5% et la somme de C_3A et C_4AF ne doit pas être supérieure à 22%.

- **Ciment pour travaux à la mer (PM, prise mer).**
- **Ciment pour travaux à haute teneur en sulfates (ES).**
- **Ciments colorés**

Sont obtenus par addition au clinker blanc de colorants minéraux résistants à la lumière et aux alcalis au cours du broyage ciment. On peut citer le bleu d'outre-mer, l'oxyde de chrome, le noir de fumée [19].

Tableau I. 1: Désignation des différents types de ciment en fonction de leur composition [20]

Ciment	Notation	K	S	D	Z	Cendres		T	L	C.S
						V	W			
% en masse		Volantes								
Portland	CEMI-CEM I	95-100	-	-	-	-	-	-	-	0 – 5
Portland compose	CPJ-CEM II/A	80 – 94	6 – 20							
	CPJ-CEM II/B	65-79	21 – 35							
De haut fourneau	CHF-CEM III/A	35-64	36-65	-	-	-	-	-	-	0 – 5
	CHF-CEM III/B	20-34	66-80	-	-	-	-	-	-	0 – 5
	CLK-CEM III/C	5-19	81-95	-	-	-	-	-	-	0 – 5
Pouzolanique	CPZ-CEM IV/A	65-90	-	10 - 35		-	-	-	-	0 – 5
	CPZ-CEM IV/B	45-64	-	36-55		-	-	-	-	0 – 5
Au laitier et aux cendres	CLC-CEM V/A	40-64	18-30	-	18-30		-	-	-	0 – 5
	CLC-CEM V/B	20-39	31-50	-	31-50		-	-	-	0 – 5

I.4.2 En fonction de leur résistance normale

Trois classes sont définies en fonction de la résistance normale à 28 jours des sous classes “R” sont associées à ces 3 classes principales pour désigner des ciments dont les résistances au jeune âge sont élevées. Ces classes sont notées, classe 32.5, classe 42.5, classe 52.5. Elles doivent respecter les spécifications et valeurs garanties du tableau 1.2 [21].

Tableau I. 2: Spécification et valeurs garanties en fonction de la classe [20]

Classe	Résistance à la compression (MPa)				Retrait à 28 jours ($\mu\text{m}/\text{m}$)	Début de prise (min)	Stabilité (mm)
	Au jeune âge		À 28 jours				
	2 Jours	7 Jours	Min	Max			
32,5	-	-	≥ 32.5	≤ 52.5	≤ 800	≥ 90	≤ 10
32,5R	$\geq 13,5$	-			≤ 1000	≥ 60	
42,5	≥ 12.5	-	≥ 42.5	≤ 62.5			
42,5R	≥ 20	-					
52,5	≥ 20	-	≥ 52.5	-	-		
52,5R	≥ 30	-					

I.5 Procédé de fabrication du ciment

Le processus de fabrication du ciment peut être décrit en plusieurs étapes clés : l'extraction des matières premières, leur broyage, le mélange, la cuisson dans un four à haute température pour obtenir le clinker, puis le broyage final du clinker avec des ajouts pour obtenir le ciment.

I.5.1 Extraction des matières premières

Les matières premières sont extraites de carrières à ciel ouvert par abattage ou ripage.

Pour le **calcaire**, l'extraction consiste à abattre la roche à l'explosif, dans des carrières à ciel ouvert, de façon à la fragmenter en blocs qui sont chargés ensuite dans des dumpers pour alimenter des concasseurs.

Alors que l'**argile**, beaucoup plus meuble, est exploitée au moyen d'excavateurs ou de roue-pelle avant d'être transportée par camions [22].

I.5.2 Concassage

Le concassage, qui est effectué le plus souvent sur les lieux mêmes de l'extraction, a pour but de réduire la taille des matériaux extraits des carrières (roches calcaires et argile) et d'obtenir des cailloux de moins de 10 cm de diamètre. Les concasseurs utilisés à cette fin peuvent être fixes ou mobiles.

Ces matières premières doivent comprendre de la chaux, de la silice, de l'alumine et de l'oxyde de fer dans des proportions bien déterminées [23].

I.5.3 Broyage des matières premières

Les roches extraites sont ensuite broyées en une fine poudre dans la station de broyage pour être chimiquement plus réactives au cours de leurs cuissons dans le four.

I.5.4 Préparation de la matière première [24]

La matière première du ciment, qui est un mélange de calcaire et d'argile, est appelée « **cru** » ou « **farine** ».

La préparation de la farine au cours de laquelle on réalise le mélange homogène du calcaire et de l'argile dans des proportions définies en fonction de leurs compositions chimiques particulières, mais toujours proches du rapport 80 de calcaire pour 20 d'argile, peut être réalisée suivant différents procédés : **par voie sèche, par voie humide, par voie semi-sèche** ou bien **par voie semi-humide**.

La voie sèche est désormais largement préférée pour fabriquer le ciment, c'est une méthode moderne, elle comporte les phases suivantes :

- **Préhomogénéisation** : cette phase qui a pour but de réaliser un mélange préliminaire, consiste à déposer les matériaux constitutifs du cru en couches successives, de faible épaisseur, formant le « tas de préhomogénéisation ».

- **Broyage-séchage** : repris à l'aide d'une roue-pelle, le mélange précédent est envoyé à la station de broyage afin d'être séché et broyé en une poudre de grains inférieurs à 160 microns.

- **Séparation** : cette phase consiste à renvoyer au broyeur les particules insuffisamment broyées et à récupérer les fines contenues dans les gaz.

- **Homogénéisation** : c'est au cours de cette phase que grâce à un brassage pneumatique ou mécanique vigoureux, peut être obtenu un produit parfaitement homogène, de caractéristiques chimiques uniformes, apte à être cuit et donner une bonne qualité du ciment.

En optant pour la voie sèche, les fabricants peuvent améliorer leur empreinte environnementale tout en augmentant leur efficacité opérationnelle lorsqu'ils produisent des ciments indispensables à divers projets de construction.



Figure I. 5: Hall de préhomogénéisation du cru [24]

I.5.5 La cuisson [24]

La cuisson est une phase clé où le clinker et les ciments sont produits. Le mélange chauffé à haute température (environ 1450°C) dans un four rotatif subit des réactions chimiques formant les phases cimentières nécessaires. Le cycle du traitement comporte les phases suivantes :

- **Le préchauffage** : qui s'effectue dans un échangeur de chaleur situé à l'amont du four (tour de préchauffage), les gaz chauds provenant du four y brassent la farine à contre-courant.
- **La décomposition des argiles** : qui se situe au-dessus de 500°C .
- **La décarbonatation des calcaires** : qui s'effectue à 950°C dans la partie médiane du four dont les températures sont comprises entre 550 et 1000°C .
- **La formation du clinker** : ou clinkérisation à 1450°C qui s'effectue en partie aval du four près du brûleur (zone de clinkérisation). A la fin de la cuisson, le clinker se présente sous la forme de granules de la taille d'une noix.



Figure I. 6: Matière en fusion à l'intérieur d'un four de cimenterie [24]

I.5.6 Refroidissement rapide du clinker

A la sortie du four, un refroidisseur à grille permet d'assurer la trempe des nodules incandescents et de les ramener à une température d'environ 100°C. Le mélange en fusion est trempé (c'est-à-dire refroidi rapidement) par soufflage d'air, afin d'obtenir la chimie cristalline appropriée pour les propriétés. Le clinker refroidi à 100°C est transporté et stocké dans un hall de plusieurs dizaines de milliers de tonnes [25].

I.5.7 Broyage du clinker pour obtenir le ciment

Le broyage a pour objectif, d'une part de réduire les granules de clinker en poudre, d'autre part de procéder à l'ajout de gypse (dont le rôle est de réguler la prise), ainsi qu'à celui des éventuels autres constituants (filler calcaire, laitier, cendres...), ce qui permet d'obtenir les différents types de ciments normalisés [26].

I.5.8 Stockage, ensachage et expédition

A partir de la sortie du broyeur, le ciment est transporté vers des silos de stockage, pour être soit ensaché (sac de 25 kg ou 50kg) soit expédié en vrac.

L'ensachage s'effectue dans des sacs en papier kraft, la livraison en vrac est assurée par camions citernes, wagons ou péniches [26].



Figure I. 7: Les grandes étapes de la fabrication du ciment

I.6 Utilisation du ciment [27]

L'industrie cimentière met aujourd'hui à la disposition de l'utilisateur un grand nombre de ciments qui présentent des caractéristiques précises et adaptées à des domaines d'emploi déterminés. La gamme étendue de compositions, de résistances, de vitesse de prise et de durcissement répond aux usages très divers qui sont faits du béton sur chantier ou en usine, pour la réalisation de bâtiments ou de structures de génie civil.

• Les ciments Portland CEM I

Les CEM I conviennent pour le béton armé ou le béton précontraint, en revanche leurs caractéristiques mécaniques n'en justifient généralement pas l'emploi pour les travaux de maçonnerie courante et les bétons en grande masse ou faiblement armés.

Les CEM I de classe R permettent un décoffrage rapide appréciable notamment en préfabrication. Les CEM I 52,5 N ou 52,5 R conviennent pour le béton armé ou précontraint pour lesquels est recherchée une résistance élevée.

Pour les travaux en milieu agressif, eaux de mer ou eaux sulfatées, on emploiera respectivement des ciments Portland pour travaux à la mer (PM), ou pour travaux en eaux à haute teneur en sulfates (ES).

• Les ciments Portland composés

Les CEM II 32,5 conviennent bien pour les travaux de maçonnerie. Les CEM II 32,5 N et 42,5 N conviennent pour les travaux de toute nature en béton armé. Les CEM II 52,5 sont adaptés au béton précontraint et au béton armé.

De façon générale, les CEM II sont bien adaptés pour les travaux massifs exigeant une élévation de température modérée. La classe R sera préférée pour les travaux exigeant des résistances initiales plus élevées. Pour les travaux en milieux agressifs, on emploiera les ciments pour travaux à la mer (PM) ou résistant aux eaux sulfatées (ES).

• Les ciments blancs

Grâce à sa blancheur, le ciment blanc permet la mise en valeur des teintes des granulats dans les bétons apparents. La pâte peut être elle-même colorée à l'aide de pigments, ce qui offre une grande variété de teintes tant pour les bétons de structure que pour les bétons architectoniques et les enduits décoratifs. La composition du béton doit être bien étudiée en fonction des granulats, des effets recherchés et du traitement de surface.

• Le ciment des hauts-fourneaux CEM III

Ouvrages situés en milieux agressifs, travaux souterrains, ouvrages pour eaux usées ou industrielles, travaux à la mer.

• Le ciment pouzzolanique CEM IV

Il est destiné en particulier à des travaux massifs en béton armé ou précontraint, aux travaux maritimes et aux ouvrages étanches.

I.7 Marché du ciment

I.7.1 La demande mondiale

La demande de ciment augmente constamment en raison de la croissance démographique et du développement économique. Les pays en développement ont un besoin croissant pour construire des infrastructures et des logements. La Chine, l'Inde et les États-Unis sont parmi les principaux consommateurs mondiaux de ciment.

Les pays en développement connaissent une forte demande pour le ciment en raison de la construction d'infrastructures telles que routes, ponts, et bâtiments. Par exemple, la Chine est le plus grand consommateur mondial de ciment en raison de son boom immobilier continu.

I.7.2 Le coût de production

Le coût de production du ciment dépend de divers facteurs tels que le prix des matières premières, l'énergie nécessaire à la cuisson et les coûts liés à la main-d'œuvre. Les fluctuations des prix des matières premières peuvent impacter directement le coût final du produit. Améliorer l'efficacité énergétique et utiliser des combustibles alternatifs peut contribuer à réduire les coûts globaux [28].

I.7.3 Marché du ciment en Algérie [12]

La consommation du ciment est fortement liée au développement local. En Algérie le besoin en ciment a fortement augmenté au cours de ces dernières années conséquence du programme de relance économique et des grands travaux initiés (autoroute est-ouest, des millions de logements avec les structures d'accompagnement, etc.).

La production du ciment en Algérie est actuellement assurée par deux groupes qui sont :

I.7.3.1 Groupe Industriel Des Ciments D'Algérie (GICA) (Secteur publique)

A l'aube de l'indépendance, le secteur du ciment en Algérie comprenait trois cimenteries, totalisant une capacité productive de l'ordre de 1,5 millions de tonnes. Depuis les années soixante-dix, la filière ciment, stratégique et indispensable au développement économique et social du pays, a bénéficié d'un grand investissement de la part des pouvoirs publics. Actuellement cette industrie totalise 12 cimenteries publiques, constituées en groupe industriel (GICA), réalisant pour l'année 2016, une production de plus de 12 millions de tonnes par an. Pour combler un déficit constant en matière de ciment, le Groupe industriel des ciments d'Algérie (GICA) projette de produire 20 Mt d'ici 2019, contre 12 Mt actuellement. Aussi, à l'instar des groupes cimentiers internationaux, le groupe GICA a diversifié ses produits en se lançant dans la production des granulats et du béton prêt à l'emploi (BPE).

I.7.3.2 Groupe Lafarge Holcim-Algérie (Secteur Privée)

Le groupe Lafarge-Holcim, leader mondial des matériaux de construction est présent en Algérie depuis 2002. Il compte quatre cimenteries actives. La cimenterie de M'sila (5,5miT/an), la cimenterie de Mascara (3miT/an), la cimenterie de Meftah (1,5miT/an) et la cimenterie de Biskra (2,7miT/an). Il totalise un volume de production de 11,5 millions de tonnes de ciment par an. Le tableau suivant expose les capacités de production ainsi que les ajouts utilisés des cimenteries nationales.

Tableau I. 3: Cimenteries Algériennes et l'utilisation des ajouts [12]

Entreprise	Wilaya	Commune	Capacité de Production (Tonnes)	Ajout Utilisé	% d'ajout	
Groupe Industriel Des Ciments D'Algérie (GICA)	ERCE	Sétif	Ain Elkebira	1.000.000	Pouzzolane	10 à 20
		Batna	Ain touta	1.000.000	Pouzzolane	10 à 20
		Constantine	Hamma Bouziane	1.000.000	Pouzzolane	10 à 15
		Skikda	HadjarSoud	950.000	Laitier	10 à 20
	ERCC	Alger	Rais Hamidou	450.000	Poussière	5 à 10
		Blida	Meftah	1.000.000	Tuf	10 à 15
		Bouira	Sour Elghouzlane	1.000.000	Tuf-Calcaire	10
	ERCO	Ain Temouchent	Beni Saf	1.200.000	Pouzzolane	10 à 20
		Mascara	Zahana	1.200.000	Pouzzolane	10 à 20
		Saida	Hassasna	500.000	Pouzzolane	10 à 20
ECDE	Chlef	Oued Sly	2.000.000	Calcaire	10 à 15	
	Oum El Bouaghi	Sigus	2.000.000	-	-	
Lafarge Algérie	ACC	M'sila	Hammam Edhlaa	4.000.000	Calcaire	10
		Mascara	Oggaz	2.000.000	Pouzzolane	15
		Biskra			-	-

Partie 2

VALORISATION DES DECHETS ORGANIQUES ET INORGANIQUES DANS LA FABRICATION DES MATERIAUX CIMENTAIRES

I.8 Introduction

Pendant de nombreuses années, la civilisation humaine a été habituée à vivre selon un modèle « fabriquer, prendre, jeter ». Une conséquence de ce mode de vie est la production à grande échelle de déchets.

La valorisation des déchets est une solution essentielle pour la préservation de l'environnement. Elle consiste à donner une nouvelle vie aux déchets en les transformant en matières premières ou en sources d'énergie. Au lieu d'envoyer les déchets dans des décharges ou de les incinérer, la valorisation des déchets permet de réduire la quantité de déchets produits et de limiter les impacts environnementaux.

A cet effet, les travaux de Génie Civil, présentent des possibilités intéressantes pour la valorisation des déchets qui doivent être exploitées en profondeur. Dans ce qui suit, on expose d'abord les déchets (notion, classification, gestion des déchets), puis on abordera les résultats des études scientifiques menées sur la valorisation des déchets des grignons d'olive et Gel de Silice dans l'industrie cimentaire.

I.9 Définition des déchets

Le déchet est un produit résiduel généré par les activités humaines, principalement industrielles, qui n'a plus d'utilité pour son créateur. Les déchets peuvent être solides, liquides ou gazeux, et peuvent provenir de diverses sources, notamment les résidus alimentaires, les déchets ménagers, les déchets industriels et les déchets hospitaliers [29].

En pratique, définir un déchet est beaucoup plus complexe. Ce qui constitue un déchet, pour l'un, peut-être une matière première pour un autre, et la frontière entre déchet et ressource est très floue.

I.10 Classification des déchets

I.10.1 Selon leur nature

La classification des déchets d'après leur nature aboutit à trois catégories Essentielles : Déchets selon leur état physique (solide, liquide, gazeux) [30].

I.10.2 Selon le mode de traitement et d'élimination

Les déchets solides sont regroupés en quatre grandes familles :

•Les déchets inertes

Un déchet inerte est un déchet qui ne subit aucune modification physique, chimique ou biologique importante, qui ne se décompose pas, ne brûle pas, ne produit aucune réaction physique ou chimique, n'est pas biodégradable et ne détériore pas les matières avec lesquelles il entre en contact d'une manière susceptible d'entraîner des atteintes à l'environnement ou à la santé humain [31].

•Les déchets banals

Cette catégorie regroupe essentiellement des déchets constitués de papiers, plastique, cartons, bois produit par des activités industrielles ou commerciales et déchets ménagers [30].

•Les déchets dangereux

Issus de la famille des déchets spéciaux, ils contiennent des quantités de substances toxiques potentiellement plus importantes et présentent de ce fait beaucoup plus de risques pour le milieu naturel (poussières d'aciéries, rejets organiques complexes, bains de traitement de surface contenant soit du chrome, cyanure ou une forte acidité, les déchets de C.F.C. et mercuriels [30].

•Les déchets spéciaux

Les déchets spéciaux sont des déchets dangereux en raison de leurs caractéristiques physicochimiques (corrosifs, explosifs, toxiques ou inflammables) potentiellement polluants et/ou dangereux pour la santé de l'homme ou pour l'environnement. Ils doivent donc subir un ensemble de traitements appropriés pour en réduire la toxicité et le risque de contamination. Ils nécessitent des filières spécifiques de collecte, transport, traitement, recyclage et élimination [30].

I.10.3 Selon l'origine

Principalement cette classification comprend de grandes classes de déchets solides basée sur la source de déchets : Déchets industriels et Déchets urbains.

•Les déchets industriels [32]

Hormis les résidus assimilables aux ordures ménagères, tant par leur nature que par leur volume modeste, on distingue dans cette classe :

- Les déchets inertes : Provenant de chantiers de construction, transformation des Combustibles et de l'énergie (gravats, cendre, ...), métallurgie (scorie, laitiers, mâchefers, ...).
- Les déchets des industries agricoles et alimentaires.
- Les déchets pouvant contenir des substances toxiques par des industries variables (ex: ateliers artisanaux, galvanoplastie, chromage, miroiterie, ...).
- Les déchets radioactifs.

•Les déchets urbains [30]

A partir de la notion « d'ordure ménagère », vocable par lequel on a longtemps désigné les résidus des ménages correspondants, par leur origine et leur nature, à une certaine limitation en quantité et en dimensions, on a été conduit du fait de l'évolution du niveau de vie répercuté par les caractéristiques quantitatives et qualitatives des déchets, à passer à la notion plus générale de résidu ou déchets urbains. Selon le mode d'enlèvement des déchets on distingue quatre catégories :

- Les déchets constitués par des éléments de faible dimension (ordures ménagères, Ordures marché, déchets artisanaux et commerciaux assimilables aux ordures ménagères).
- Les déchets hospitaliers qui, sans exception, font l'objet de collecte séparée.
- Les déchets encombrants appelés aussi << les monstres >> constituent par des objets volumineux qui ont été reformés et mis au rebus (vienne baignoire, vieux sommier...).
- Les souillures qui proviennent du nettoyage et du balayage des voies publiques (feuilles, branchage, déchets des plages...).

•Les déchets Ultimes :

Il s'agit des déchets résultants ou non d'un traitement d'autres déchets, qui ne sont plus susceptibles d'être traités dans les conditions techniques et économiques du moment, notamment par extraction de la part valorisable ou par la réduction de son caractère polluant et dangereux [33].

I.10.4 Selon le comportement et les effets sur l'environnement

A ce titre on distingue [34] :

•Les déchets inertes

Pouvant être différenciés suivant leur caractère plus ou moins encombrant, en débris plus ou moins volumineux jusqu'aux carasses d'automobiles, chars, avions, bus, ...etc.

•Les déchets fermentescibles

Principalement constitués par la matière organique, animale ou végétale à différents stades et fermentation aérobies ou anaérobies.

•Les déchets toxiques

Poisons chimiques ou radioactifs qui sont générés soit par des industries, soit par des laboratoires ou tout simplement par des particuliers qui se débarrassent avec leurs ordures de certains résidus qui devraient être récupérés séparément (ex : flacons de médicament, seringues, piles, ...).

I.11 Gestion des déchets

La gestion des déchets constitue une préoccupation majeure pour les autorités en charge de secteur, donc il est important de connaître les différents types de déchets dangereux, leurs quantités, leur nature, les contraintes réglementaires, les risques sanitaires, leurs interactions [35].

La disposition relative à la gestion des déchets est définie par des différentes méthodes :

I.11.1 Réduction de la production à la source

C'est la notion qui consiste à générer le moins de déchets lors de la fabrication, de la distribution et de l'utilisation du produit. Le citoyen peut contribuer à cette réduction en diminuant la quantité de déchets produite par l'utilisation de produit en vrac plutôt qu'emballés, des produits durables plutôt que jetables, c'est le mode le moins coûteux à réaliser puisqu'il appelle à notre manière de consommer et au fabricant d'opter pour d'autres procédés de fabrication de produits [36].

I.11.2 Valorisation énergétique des déchets

Toute opération de recyclage, de réemploi, de récupération, d'utilisation des déchets comme source d'énergie toute autre action visant à obtenir des matières premières ou des produits réutilisables provenant de la récupération des déchets, et ce, afin de réduire ou d'éliminer l'impact négatif de ces déchets sur l'environnement [37].

I.11.3 Elimination de déchet

L'élimination des déchets constitue le niveau hiérarchique le plus bas de la gestion des déchets. Elle est réservée aux seuls déchets qui ne se prêtent plus à une opération de réutilisation, de recyclage ou de valorisation.

L'élimination des déchets doit être effectuée dans des installations qui répondent aux meilleures techniques disponibles en la matière. Les techniques d'élimination à mettre en œuvre doivent répondre à la nature des différentes fractions de déchets. Dans la mesure du possible et de l'utile, les déchets à éliminer doivent être soumis au préalable à une opération de prétraitement. Les objectifs en sont notamment la modification des propriétés des déchets pour réduire leur impact lors de l'élimination proprement dite (par exemple : traitement biologique des déchets municipaux préalablement à leur mise en décharge) ou encore une séparation des différentes composantes des déchets en vue de les soumettre aux opérations d'élimination les plus appropriées [38].

I.11.4 Recyclage ou valorisation des “ sous-produits ” de la fabrication

Le recyclage est l'un des procédés de traitement des déchets industriels et des déchets ménagers qui permet de réintroduire, dans le cycle de production d'un produit, des matériaux qui le composent. Le recyclage apporte une contribution importante à la baisse des quantités de déchets à éliminer par enfouissement, par incinération ou autre moyen. IL est défini comme la récupération de matériaux utiles, tels que le papier, le verre, le plastique et les métaux, ainsi que la transformation des matériaux, pour fabriquer de nouveaux produits afin de réduire la quantité de matières premières vierges nécessaires pour répondre aux demandes des consommateurs [39].

I.12 Déchets du grignon d'olive

Le bassin méditerranéen en général, et l'Algérie en particulier, se caractérise par une importante activité oléicole. La répartition mondiale des oliviers est fortement localisée dans la région méditerranéenne [40]. La transformation de l'olive en huile génère un déchet

appelé grignon d'olive (pulpe et noyaux). Traditionnellement, ce déchet est valorisé sous forme de combustible et d'engrais.

Tableau I. 4: Répartition mondiale des oliviers et surfaces cultivées correspondantes [40]

Régions	Nombre d'arbres en %	Surfaces cultivées en %
Europe Méditerranéenne	71	65
Proche Orient	13	11
Afrique du Nord	13	22
Amérique latine et USA	3	2

I.12.1 Les grignons d'olives

Les grignons d'olives sont des sous-produits de l'activité des moulins à huile. Ils sont obtenus par des moyens strictement mécaniques excluant tout adjuvant (noyau, pulpe et peau de l'olive) sont des produits plus ou moins pâteux [41].

Selon le procédé d'extraction et l'équipement des huileries, il est possible de distinguer trois types de grignons :

•Le grignon brut

C'est le résidu de la première extraction de l'huile par pression de l'olive entière, ses teneurs relativement élevées en eau (24%) et en huile (9%) favorisent son altération rapide lorsqu'il est laissé à l'air libre.

•Le grignon épuisé

C'est le résidu obtenu après des huilages du grignon brut par un solvant, généralement l'hexane. Il diffère, essentiellement, par une plus faible teneur en huile et une teneur en eau réduite du fait qu'il a été déshydraté au cours du processus de l'extraction.

•Le grignon partiellement dénoyauté

Résulte de la séparation partielle du noyau de la pulpe par tamisage ou ventilation, il est dit "gras" si son huile n'est pas extraite par solvant il est dit "dégraissé ou épuisé" si son huile est extraite par solvant.

I.12.2 Caractéristiques physiques du grignon d'olive

Les grignons bruts renferment la coque du noyau, réduite en morceaux, la peau et la pulpe broyée de l'olive, environ 25% d'eau et encore une certaine quantité d'huile qui favorisent leur altération rapide. Les grignons épuisés diffèrent essentiellement par une plus faible teneur en huile et une teneur en eau réduite du fait qu'ils ont été déshydratés au cours du processus de l'extraction.

Les grignons épuisés partiellement dénoyautés sont constitués essentiellement par la pulpe (mésocarpe) et contiennent encore une petite proportion de coques qui ne peuvent être séparées complètement par les procédés de tamisage ou de ventilation utilisés [41].

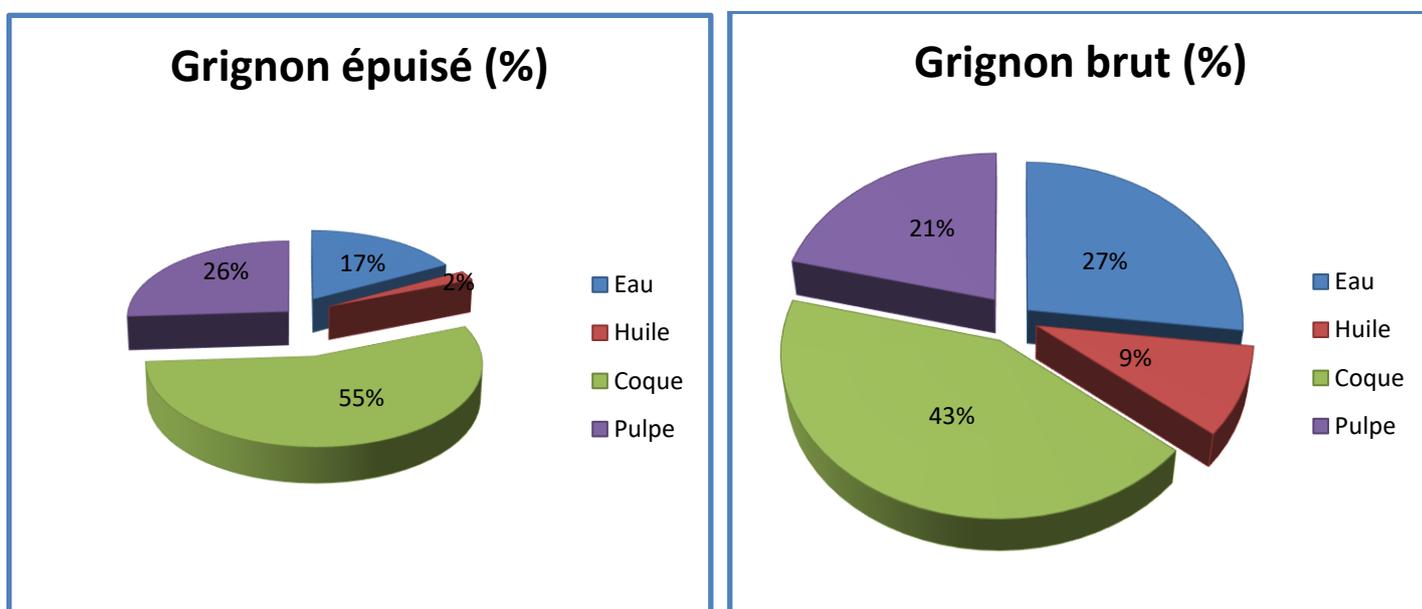


Figure I. 8: Les différents composants du grignon d'olive

I.12.3 Composition chimique du grignon d'olive

Contrairement aux autres tourteaux oléagineux les grignons bruts sont pauvres en matières azotées et riches en cellulose brute. Ils restent relativement riches en matières grasses. L'épuisement par les solvants diminue la teneur en matières grasses et augmente relativement les autres teneurs. Le dénoyautage partiel par tamisage ou ventilation réduit les teneurs en cellulose brute. Les pulpes, du fait de la séparation totale du noyau avant pression, ont la valeur la plus faible en cellulose brut [41].

Tableau I. 5: Composition chimique indicative des différents types de grignon d'olive [41]

Type	% de la Matière Sèche				
	Matière Sèche	Matières Minérales	Mat. Az. Totales	Cellulose Brute	Matières Grasses
Grignon Brut	75–80	3–5	5–10	35–50	8–15
Gr. Gras partie. Dénoyauté	80–95	6–7	9–12	20–30	15–30
Grignon Epuisé	85–90	7–10	8–10	35–40	4–6
Gr. Epuisé part. dénoyauté	85–90	6–8	9–14	15–35	4–6
Pulpe Grasse	35–40	5–8	9–13	16–25	26–33

Les valeurs indiquées ci-dessus sont très variables principalement pour les grignons bruts et les grignons gras partiellement dénoyautés et ne peuvent être considérées que comme indicatives.

Il est à noter que ces différents grignons proviennent d'olives d'origines variées et ont subi des traitements différents ce qui explique l'hétérogénéité de certains résultats.

I.12.4 Valorisation du grignon d'olive

Le grignon d'olive est une ressource renouvelable, qui peut occasionner de la pollution à cause de sa teneur en matière organique, si elle n'est pas valorisée.

Les domaines d'application des grignons sont nombreux et variés. On peut mentionner :

• Utilisation du grignon d'olive comme combustible

Elle représente encore dans la majorité des pays l'application la plus courante. En réalité, le grignon d'olive est un combustible de valeur calorifique moyenne (2950 Kcal/ kg). Cette quantité de chaleur est apportée principalement par la coque qui représente 60% du total et qui a un pouvoir calorifique relativement élevé (4000 Kcal/kg). La pulpe n'apporte que peu de calories (1400 Kcal/kg) [42].

• Utilisation des grignons d'olive pour la fertilisation des terres agricoles

Utilisation des grignons d'olive sur les terres agricoles pour l'amélioration de la fertilité des sols et de la productivité des cultures.

- **Utilisation du grignon d'olive comme alimentation animale**

Les grignons d'olive, sous leurs différentes formes sont utilisés dans la plupart des pays dans l'alimentation animal après addition d'autre composantes (son, cactus, mélasse, fourrage ...etc.) [43].

- **Utilisation du grignon d'olive comme absorbant**

La préparation du charbon actif à partir du grignon d'olive a fait l'objet de plusieurs recherches pour son pouvoir de bio sorption des métaux lourds et du phénol. C'est une technologie alternative dans le traitement des eaux usées et de la margine [44].

- **Utilisation des grignons dans les matériaux de construction**

La réutilisation des grignons d'olives en tant que matière première dans l'industrie du bâtiment, permettra non seulement de réduire les déchets issus de l'industrie oléicole, mais aussi de compenser le coût des matières premières. Effectivement c'est un moyen écologique et durable toute en préservant les ressources naturelles.

I.13 Déchets de Gel de Silice

Ce sont de petits sachets généralement On les trouve dans les emballages de nos achats (chaussures, appareils électroniques, électronique, sac à main, les bijoux, certains jeux, les vêtements et même les meubles.), dans ces sachet appelées Gel de Silice, se trouve des billes transparentes de dioxyde de silicium. Principalement connu pour son action anti humidité, capable d'absorber jusqu'à 30% de sa masse en eau.

Il est utilisé sous deux formes : le Gel de Silice indicateur et le Gel de Silice non-indicateur. Le Gel de Silice indicateur contient du cobalt qui fait changer la couleur des cristaux lorsque l'humidité est absorbée. Il n'est pas classé comme déchet dangereux au sens de la directive 91/689/CEE, ils peuvent être ajoutés aux déchets ménagers recyclables [45].

Nous avons l'habitude de le jeter soit avant ou après l'avoir utilisé, mais ce Gel de Silice pourrait s'avérer utile à bien des égards dans le domaine de génie civil et surtout dans la formulation des bétons et les ciments par ce qu'il joue le même rôle que le fumé de silice.

I.13.1 Définition de Gel de Silice

Le Gel de Silice ou Gel de Silice est un déshydratant ayant des propriétés d'absorption d'humidité importantes. Composé de dioxyde de silicium SiO_2 , des atomes de silicium et d'hydrogène, il absorbe jusqu'à 30 % de son poids en eau [46].

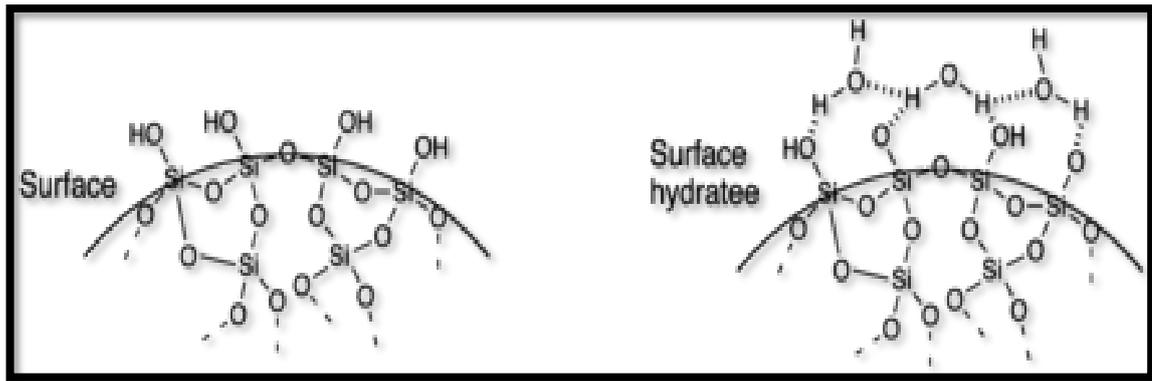


Figure I. 9: Surface du Gel de Silice sec et hydraté [46]

I.13.2 Structure et propriétés

Les grains de Gel de Silice sont poreux et la taille des grains et des pores dépend très fortement de la méthode de préparation utilisée. Cette structure est responsable de la faible densité des grains, et de leur très grande surface spécifique, typiquement 500–600 m²/g.

L'intérieur de chaque grain de silice est composé d'atomes de silicium reliés entre eux par des atomes d'oxygène (c'est un silicate). En surface, des groupes silanol (Si–OH) subsistent et sont responsables de la très forte polarité du Gel de Silice.

En présence d'eau, cette surface s'hydrate ce qui provoque une diminution de la polarité, l'adsorption d'une grande quantité d'eau (des produits grand public sont vendus pour absorber 30 % de leur masse en eau), et souvent un changement de couleur du gel [46].



Figure I. 10: Perles de Gel de Silice

I.13.3 Gel de Silice utilisation [47]

Gel de Silice peut être utilisé dans toute application ayant besoin d'une absorption d'humidité ambiante, aussi bien dans l'emballage comme dans des espaces fermés. Actuellement le Gel de Silice est utilisé dans les industries suivantes :

- Industrie alimentaire (peut être en contact direct avec les aliments grâce à un tissu de sac spécifique).
- Industrie pharmaceutique.
- Industrie textile, cuir, fourrure, etc.
- Secteur de la technologie.
- Industrie chimique.
- Equipement médical.
- Instruments optiques (matériel photographique).
- Equipement technique.
- Horticulture (séchage de plantes, fleurs et graines).
- Animaux domestiques.

I.13.4 Régénération de Gel de Silice [48]

La grande majorité des sachets que l'on retrouve dans les emballages ont en effet déjà fait leur travail d'absorption de l'humidité et sont donc épuisés. Nous ne pouvons certainement pas les prendre tels quels et les réutiliser, car leur capacité absorbante et déshydratante est désormais réduite au minimum et ils sont saturé d'humidité.

La régénération du Gel de Silice se fait par chauffage. Il existe deux principales options de régénération sont l'utilisation du four et de micro-onde. Cependant, il est important de noter que tous les types de Gel de Silice ne conviennent pas aux deux méthodes.

I.13.4.1 Régénération du four traditionnel

- Préchauffer le four à basse température, environ 90-100 degrés Celsius.
- Étaler uniformément les granules de Gel de Silice sur une plaque à pâtisserie ou une surface plane résistante à la chaleur.
- Cuire au four plusieurs heures (généralement 2 à 4 heures), en vérifiant périodiquement. Le but est d'éliminer l'humidité absorbée par le Gel de Silice.
- Laisser-le refroidir complètement avant de réutiliser le Gel de Silice.

I.13.4.2 Régénération micro-ondes

- Étaler le Gel de Silice dans un récipient allant à la micro-onde, en veillant à suivre les instructions du fabricant.
- Chauffer à faible puissance (environ 450 W) pendant de courtes périodes, en vérifiant fréquemment. Utiliser des intervalles de 10 à 20 secondes pour éviter la surchauffe.

- Vérifier la consistance du Gel de Silice pendant le processus et s'arrêter lorsqu'il semble sec. Ne pas exposer le Gel de Silice trop longtemps à la micro-onde, car cela pourrait l'endommager.

- Le laisser refroidir complètement avant de réutiliser le Gel de Silice.

I.13.5 Le Gel de Silice au lieu de la fumée de silice dans la fabrication de ciment

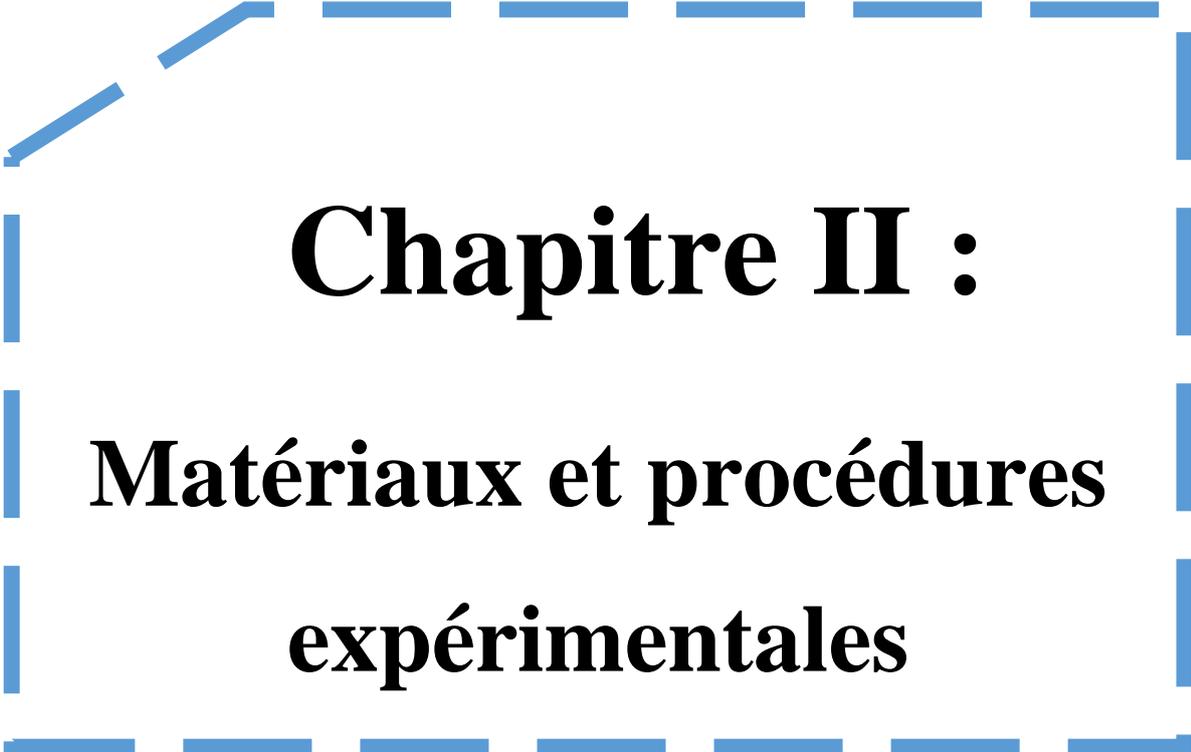
La fumée de silice est un sous-produit de la production d'alliages de silicium et de ferrosilicium, et il est utilisé comme matériau cimentaire d'appoint dans le béton depuis les années 1950. C'est une pouzzolane très réactive, ce qui signifie qu'il peut réagir avec l'hydroxyde de calcium en présence d'eau pour former un produit cimentaire stable et durable [49].

Le principal composant de la fumée de silice est le dioxyde de silicium amorphe SiO_2 dans une plage de 85 % à 98 %. Les principales impuretés sont le carbone, le carbure de silicium et les oxydes de métaux alcalins (terre) [50].

L'idée est venue, donc, d'utiliser le Gel de Silice composé d'oxyde de silicium régénère, à cause de son taux faible en impuretés en lieu et place de la fumée de silice.

I.14 Conclusion

Cette étude bibliographique a permis de multiplier nos connaissances sur les caractéristiques des ciments et les déchets en général et les déchets des grignons d'olive et sachets de Gel de Silice en particulier, de mettre un point sur la possibilité de valoriser ces déchets dans le domaine de fabrication cimentaire afin de réduire la consommation de clinker et par conséquent la diminution des émissions gaz à effet de serre comme le dioxyde de carbone par exemple.



Chapitre II :
Matériaux et procédures
expérimentales

CHAPITRE II :

MATERIAUX ET PROCEDURES EXPERIMENTALES

II . Introduction

Nous allons présenter dans ce chapitre, les essais de caractérisation effectués sur les ciments élaborés. Ces essais qui ont été conduits conformément aux différentes normes Algériennes et Européennes, sont réalisés majoritairement dans le laboratoire du control continu de cimenterie de Hdjar-soud Wilaya de Skikda Skikda et le laboratoire pédagogique du département de Génie Civil et Hydraulique de notre université (8 Mai 1945 de Guelma). A cet effet, Pour chaque procédure expérimentale nous présenterons son objective et son principe.

II.1 Préparation des nouveaux ciments

Il est indispensable de définir l'origine des matériaux utilisés.

II.1.1 Le ciment

Le ciment utilisé est le **CEM I – CEMI 42.5** de la société des ciments **La BISKRIA CIMENT**.



Figure II. 1: Ciment CEM I – CEMI 42.5 utilisé dans les essais

II.1.2 Le grignon d'Olive

Le grignon d'olive utilisé provient de l'**HUILERIE MEDDOUR** situé à **BOUAATI** willaya de GUELMA.



Figure II. 2: A) Déchets d'huile d'olive/ B) HUILERIE MEDDOUR-BOUAATI- Willaya de Guelma

II.1.2.1 Cendres du grignon d'olive

Les cendres du grignon d'olive sont de fines particules obtenues par la calcination (cuisson) du grignon d'olive.



Figure II. 3: Cendre du grignon d'olive

II.1.2.2 Etapes à suivre pour l'obtention des cendres du grignon d'olive [51]

- **Nettoyage** : le grignon d'olive a été lavé pour éliminer toutes les impuretés (Margines, pierre...).
- **Etuvage** : après avoir lavé le grignon, ce dernier a été séché à l'étuve à 105°C pendant 24h.
- **Calcination** : faire cuire le grignon dans un four de type Nabertherm more than, heat 30-3000°C. La cuisson se fait en augmentant la température jusqu'à 600°C pendant 30

min, ensuite cette dernière est stabilisée pendant 30 min, Le choix de cette température a été motivé par le fait que les pertes se stabilisent à cette température et les cendres sont produites lors de la combustion.

Remarque : vu que l'absence du four à calcination au niveau de notre laboratoire, nous avons utilisé un poêle à gaz avec une marmite en argile comme montré sur la figure

- **Broyage après cuisson :** à l'aide d'un hachoir, le grignon d'olive cuit a été Broyé.
- **Tamisage :** après broyage les cendres sont tamisées avec un tamis 100 μ m.



Nettoyage



Etuvage



Broyage



Calcination

Figure II. 4: Etapes à suivre pour l'obtention des cendres du grignon d'olive

II.1.2.3 Avantages et inconvénients de la calcination des grignons d'olive

➤ Inconvénients

Pollution de l'air par le dégagement de gaz à effet de serre (exemple du CO₂), bien que les concentrations de ces gaz soient beaucoup moins importantes que ceux produits par les

combustibles fossiles. Il est à signaler que le grignon d'olive contient une faible quantité de matières azotées [52].

➤ Avantages

Sa combustion est une valorisation énergétique comme source de biomasse. Le grignon d'olive est un combustible de valeur calorifique moyenne (2950 Kcal/Kg) [53].

II.1.3 Le Gel de Silice

Le Gel de Silice est obtenu à partir de sacs d'emballage de déchets provenant de chaussures, de vêtements et de boîtes de médicaments.



Figure II. 5: Grains de Gel de Silice obtenu à partir de déchets des médicaments et sacs d'emballage des chaussures et vêtements

II.1.3.1 La poudre de Gel de Silice

La poudre de silice est un matériau inorganique non métallique non toxique, inodore et non polluant.

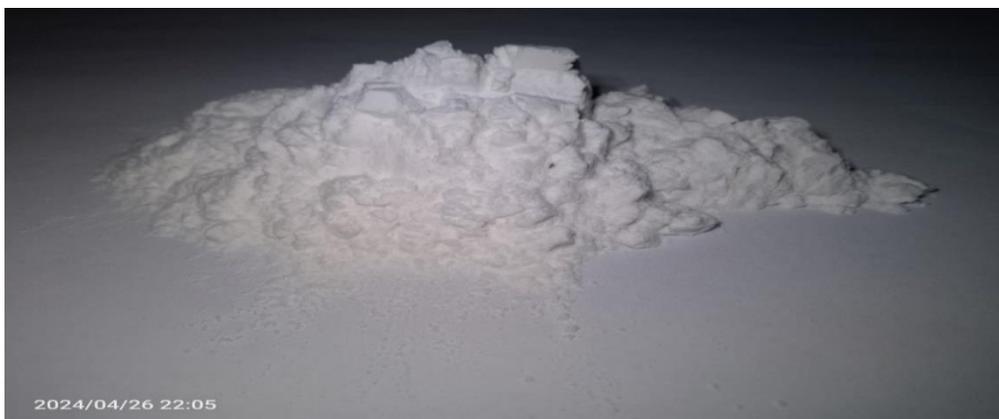
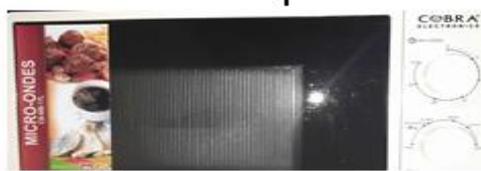


Figure II. 6: Poudre de Gel de Silice

II.1.3.2 Préparation de la poudre de Gel de Silice

- **Chauffage** : Après avoir ouvrir les boîtes et les sachets de Gel de Silice, nous les chauffons sous micro-ondes jusqu'à l'élimination de l'humidité absorbée par les particules de Gel de Silice.
- **Concassage** : On fractionne les grains de Gel de Silice.
- **Tamisage** : On effectue un tamisage par un tamis de 80 μm .



Micro-ondes pour chauffé les grains de silice



Changement de couleur avant et après échauffement



Concassage



Tamisage

Figure II. 7: Etape à suivre pour préparer la poudre de silice

II.2 Caractérisation des ajouts utilisés

II.2.1 Cendre des grignons d'olive

La composition chimique de poudre a été tirée de la littérature [54] et ses propriétés physiques (masse volumique absolue et la surface spécifique de Blaine) sont réalisées au laboratoire de la cimenterie de Hadjar Soud.

Les résultats sont présentés dans les tableaux 2.1 et 2.2 :

Tableau II. 1: Composition chimique de la cendre des grignons d'olive [54]

Composants	CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	PAF
(%)	42.9	8.5	5.7	25.8	3.2	0.25	0.33	3.8	9.5

Remarque : On a trouvé un teneur de 71.07% de la perte au feu dans notre cendre utilisée et cette augmentation est causé de la plus grande proportion de matières organiques et volatiles qui se volatiles à haute température ce que nous ne pouvions pas atteindre avec le poêle à gaz.

Tableau II. 2: Propriétés physiques de la cendre des grignons d'olive

Propriétés	Valeur
Masse volumique apparente (g/cm ³)	441.6
Masse volumique absolu (g/cm ³)	1.44
La finesse (%)	29.41
Surface spécifique de Blaine (cm ² /g)	405.2
Couleur	Noire



Figure II. 8: Essai masse volumique absolue de la cendre.

II.2.2 Poudre de Gel de Silice

Le Gel de Silice est composé chimiquement de dioxyde de silicium SiO_2 .

Les propriétés physiques de cette poudre sont présentées dans le tableau suivant :

Tableau II. 3: Propriétés physiques de la poudre de Gel de Silice

Propriétés	Valeur
Masse volumique apparente (g/cm ³)	570
Masse volumique absolu (g/cm ³)	0.70
La finesse (%)	0.67
Surface spécifique de Blaine (cm ² /g)	502
Couleur	Blanc

II.3 Formulation des différents ciments utilisés dans notre étude

Après la préparation des ajouts en fait la formulation du nouveau ciment à base de CEMI, nous avons élaboré six échantillons de ciments composés en faisant varier la proportion des déchets de cendre des grignons d'olive de 10 à 30 % et de 2.5% à 7.5% de poudre Gel de Silice.

Les tableaux 2.4 donnent les compositions des différents ciments élaborés :

Tableau II. 4 : a) Désignation et dosage des ciments élaborés de la cendre d'olive/B) Désignation et dosage des ciments élaborés du Gel de Silice

a)

Ciment	E0	E10	E20	E30
CEMI (%)	100	90	80	70
Cendre d'olive (%)	0	10	20	30

b)

Ciment	E0	E2.5	E5	E7.5
CEMI (%)	100	97.5	95	92.5
Poudre de Gel de Silice (%)	0	2.5	5	7.5

II.4 Essais effectués

II.4.1 Préparation des mortiers normalisés

Le mortier pour essai est préparé dans un malaxeur de 5 litres et serré dans un moule à l'aide d'un appareil à choc normalisé. Les éprouvettes sont de forme prismatique 4 cm x 4cm x 16 cm. Le mortier normal pour essai est constitué d'une partie (en masse) de Ciment et de trois parties (en masse) de sable normalisé avec un rapport Eau/Ciment égale à 0.50 d'eau.

En utilisant les proportions suivantes selon **la Norme EN196-1(2016)** [55] :

- 450 g \pm 2 g de ciment.
- 1350 g \pm 5 g de sable normalisé.
- 225 g \pm 1 g d'eau potable de robinet.

Avant d'être utilisé pour les différents essais ce mortier est malaxé pendant 4 minutes conformément aux prescriptions de la Norme EN196- 1(voir le tableau 2.5).

Tableau II. 5: Malaxage d'un mortier normal [55]

Opérations	Introduction De l'eau	Introduction Du ciment	Introduction Du sable			Raclage De la Cuve	
Durée		30 s	30 s	30 s	15 s	75 s	60 s
Etat de Malaxeur	Arrêt		Vitesse lente		Vitesse rapide	Arrêt	
							Vitesse rapide



Figure II. 9: A) Malaxeur pour la préparation du mortier normalisé/B) Table vibratoire

Avec le mortier normal préparé on remplit un moule (4x4x16)cm³. Le serrage du mortier dans ce moule est obtenu en introduisant le mortier en deux couches et en appliquant au moule 60 chocs à chaque fois. Le moule est arasé, vibré et recouvert d'une plaque de verre et entreposé dans la salle ou l'armoire humide. Après 24 h du début du malaxage, ces éprouvettes sont démoulées et entreposées dans de l'eau à 20 °C ± 1°C jusqu'au moment de l'essai.

II.4.2 Essais de caractérisation chimique

II.4.2.1 Perte au feu (PAF)

La perte au feu est l'élimination de CO₂, l'eau de constitution et les matières organiques. Elle (PAF) a été déterminée en atmosphère oxydante (air) et conduite selon les prescriptions de la norme Algérienne NA235 [56] et sa vérification est faite selon la norme NA442 [71].



Figure II. 10: Four de calcination pour PAF

II.4.2.2 Compositions chimiques par Fluorescence X

L'analyse chimique par spectromètre à fluorescence X [57] consiste à déterminer le pourcentage des différents oxydes dans la matière à étudier (SiO_2 , AlO_3 , Fe_2O_3 , MgO , Cl -, Na_2O , K_2O , SO_3) ainsi le calcul des modules et des indices. Dans son principe, un faisceau des rayons X est dirigé sur l'échantillon à analyser, provoquant l'émission par ce dernier des radiations X secondaire, dites de fluorescence. Ces radiations ont les longueurs d'onde caractéristiques de chaque élément contenu dans l'échantillon. La radiation est canalisée vers un cristal analyseur qui sépare les diverses longueurs d'ondes et les diffracte vers un détecteur. Les couches d'électrons concernées sont principalement les couches inertes (K, L). La mesure de l'intensité de chacune des raies caractéristiques des éléments à analyser (Ca, Si, Al, Fe, etc.) est faite par spectromètre.



Figure II. 11: Spectromètre à Fluorescence X

II.4.2.3 Teneur en (CAO) libre

La teneur en chaux libre dans le clinker et les ciments élaborés est déterminée conformément à **la norme NA2187** [58].



Figure II. 12: Essai de la teneur en CaO libre

II.4.3 Essais de caractérisations physiques

II.4.3.1 Masse volumique absolue des ciments anhydres

Les masses volumiques sont mesurées sur poudre de ciment anhydre conformément à **la norme NA2595** [59]. La masse volumique absolue est mesurée à l'aide du densimètre Le Chatelier en utilisant l'Alcool comme solution inerte. La masse volumique absolue est mesurée avec l'équipement illustré dans la Figure 2.8, en utilisant la formule suivante :

$$P_{\text{abs}} = \frac{M}{V_2 - V_1} \quad (2.1)$$

M : Masse de l'échantillon de ciment.

V₁ : Volume initial de l'Alcool.

V₂ : Volume après l'introduction de l'échantillon de ciment.



Figure II. 13: Masse volumique absolue d'un échantillon des ciments élaborés

II.4.3.2 Masse volumique apparente des ciments anhydres

La masse volumique apparente est la masse d'un corps par unité de volume y compris les vides entre les grains. Cet essai est réalisé selon **la norme NF EN 1097-3** [60]. L'essai consiste à remplir un récipient vide d'un litre de volume par un matériau sec sans le tasser et à peser ensuite cette quantité de matériau. On calcule la valeur de la masse volumique apparente par le rapport :

$$\rho = \frac{M_2 - M_1}{V} \quad (2.2)$$

M_1 : Masse du récipient vide.

M_2 : Masse du récipient après l'avoir rempli par le ciment.

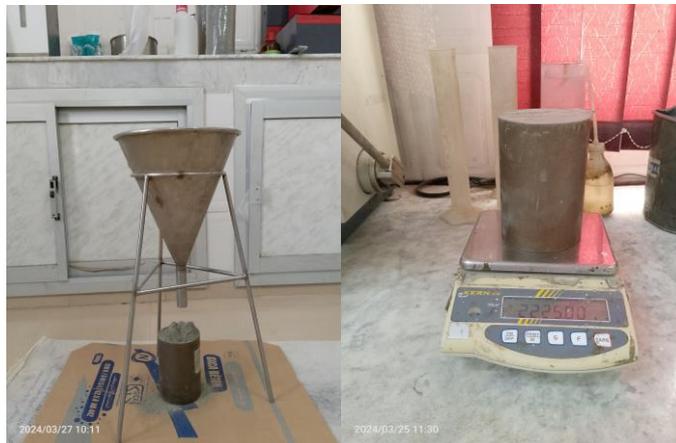


Figure II. 14: Masse volumique apparente des ciments anhydres

II.4.3.3 La finesse par tamisage

La méthode par tamisage sert uniquement à détecter la présence des grosses particules de ciment.

- **Principe :**

La finesse du ciment est mesurée par tamisage sur des tamis normalisés. Ainsi est déterminé le pourcentage du ciment dans les dimensions des grains sont supérieures aux dimensions de la maille spécifiée.

- **Appareillage :**

- **Tamis d'essai :** le tamis d'essai comprend une monture cylindrique rigide, résistante, non corrodable en toile de mailles de 45 μ m d'ouverture en acier inoxydable tissé ou en fils d'autre métal résistant à l'abrasion et non corrodable.
- **Balance :** une balance permettant de peser jusqu'à 10 g à 10 mg près.
- **Aspirateur :** Pour stoker le ciment qui passe à travers le tamis [61].



Figure II. 15: La finesse par tamisage

II.4.3.4 Mesure de la surface spécifique de Blaine (SSB) des ciments

La surface spécifique de Blaine de la poudre de ciment est mesurée à l'aide d'un perméabilimètre de Blaine, sa description complète et son principe de fonctionnement sont données par **la norme EN 196-6** [61].



Figure II. 16: Appareil de Blaine (SSB)

II.4.3.5 Essai de consistance normale des ciments

La consistance normalisée d'une pâte de ciment caractérise sa plus au moins grande fluidité. Pour pouvoir étudier l'évolution de la consistance en fonction des différents paramètres il faut pouvoir partir d'une même consistance qui soit la même pour toutes les pâtes étudiées. Elle est nécessaire pour déterminer les temps de début et fin de prise ainsi que l'essai de stabilité. La variation de la consistance normale est déterminée conformément à **la norme**

NA229 [62] à l'aide de l'appareil de Vicat qui se compose d'un moule tronconique de 40mm de hauteur et d'une tige coulissante équipée à son extrémité par une sonde d'un diamètre $\varnothing = 10\text{mm}$. La partie coulissante a une masse de 300g (y compris la sonde amovible). Après avoir préparé la pâte pure de ciment, elle placée dans le moule. Lorsque la sonde s'arrête à une distance $d=6\pm 1\text{mm}$ de la plaque de base plane, la consistance est considérée comme consistance normale.



Figure II. 17: Appareil de Vicat

II.4.3.6 Essai de temps de prise

Le temps de début de prise correspond à peu près au moment où la pâte cesse d'être mouillable et commence à se comporter comme un solide mécaniquement résistant. La fin de prise correspond à la transformation régulière et progressive de la pâte de ciment en un bloc rigide. L'essai du temps de début et de fin de prise est réalisé suivant **la norme NA230** [63] grâce à l'appareil de Vicat (Figure 2.18), dans une enceinte dont la température est maintenue à $24 \pm 3^\circ\text{C}$. L'on mesure l'enfoncement d'une aiguille de diamètre $\varnothing = 1,13\text{mm}$, fixée à la partie mobile de l'appareil de Vicat, dont la masse totale est de 300g, dans une pâte pure de ciment maintenue dans un moule tronconique de 40mm de hauteur. Lorsque l'aiguille s'arrête à une distance $d = 4 \pm 1\text{mm}$ de la plaque de base plane, le temps de début de prise est enregistré. La fin de prise correspond au moment où l'aiguille ne s'enfonce plus dans l'anneau c'est-à-dire une transformation régulière et progressive de la pâte de ciment en un bloc rigide.



Figure II. 18: Prisomètre (Vicat automatique)

II.4.4 Essai sur mortier normalisé

II.4.4.1 Masse volumique apparente des mortiers à l'état frais

La mesure de la masse volumique à l'état frais est effectuée par remplissage d'un récipient de volume connu par le mortier frais de chaque échantillon. La masse volumique à l'état frais du mortier est donnée par la formule suivant [64] :

$$\rho_f = \frac{M_1 - M_0}{V} \quad (2.3)$$

M_0 : Masse du récipient vide.

M_1 : Masse de l'échantillon plus récipient.

V : volume du récipient.



Figure II. 19: Masse volumique apparente à l'état frais du mortier

II.4.4.2 Masse volumique apparente à l'état durci d'éprouvette de mortier

La masse volumique sèche d'une éprouvette de mortier durci s'obtient par le quotient de sa masse à l'état sec en étuve par le volume qu'elle occupe lorsqu'elle est immergée dans l'eau à l'état saturé. Elle est calculée par la formule suivante [65] :

$$\rho = \frac{M_{\text{air}}}{M_{\text{air}} - M_{\text{eau}}} \quad (2.4)$$

M_{air} : Masse de l'échantillon sec après passage à l'étuve à 105°C.

M_{eau} : Masse de l'échantillon immergée dans l'eau.

II.4.4.3 Test d'étalement

L'essai d'étalement est basé sur **la norme EN 1015-3** [66]. Il est réalisé à température ambiante, avec un malaxage pendant 10 min, puis un coulage de la pâte dans un cône standard (Figure 2.20) ayant un diamètre intérieur de 10 cm. Après le soulèvement du cône et l'étalement de la pâte, deux mesures sur deux diamètres perpendiculaires (d_1 et d_2) sont effectuées. La valeur d'étalement est donnée par la formule :

$$F = \frac{D_1 + D_2}{2} \quad (2.5)$$

D_1 Et D_2 les deux diamètres perpendiculaires (en cm).

La mesure des diamètres d'étalement des pâtes fraîches sur une surface plane permet le contrôle de la consistance et le suivi de la maniabilité des formulations.



Figure II. 20: Tests d'étalement

Tableau II. 6: Valeurs d'étalement [66]

Consistance d'utilisation	Valeurs d'étalement
Mortier raide	< 14 mm
Mortier plastique	Entre 140 et 200 mm
Mortier fluide	> 200 mm

II.4.4.4 Absorption d'eau par immersion totale

L'absorption d'eau par immersion d'un mortier est déterminée selon la prescription de la norme **NBN B15-215 (2018)** [67].

L'essai consiste à un séchage des éprouvettes (4x4x16) cm³ du mortier jusqu'à masse sèche constante dans une étuve ventilée dont la température est maintenue à 105°C. Ensuite l'immersion totale des éprouvettes dans un bac à eau à 20±2°C durant un minimum de 48h et jusqu'à saturation du matériau. Avant la pesée l'éprouvette est essuyée avec une éponge humide de manière à la débarrasser de son eau superficielle. La masse est considérée constante lorsque deux pesées successives à 24h d'intervalle ne donnent pas une différence supérieure à 0.1%. Une fois la masse saturée est obtenue et la masse à sec préalablement connue, nous avons déterminé la masse d'eau absorbée.

L'absorption d'eau par immersion A_b est exprimée en % de la masse sèche et est calculée par la relation suivante :

$$A_b = \frac{M_{\text{air}} - M_s}{M_s} \times 100 \quad (2.5)$$

M_{air} : Masse de l'échantillon imbibé d'eau.

M_s : Masse de l'échantillon sec après passage à l'étuve à 105°C.



Figure II. 21: Conservation des éprouvettes à l'eau potable

II.4.4.5 Essai de porosité accessible à l'eau

La porosité accessible à l'eau a été mesurée par pesée hydrostatique, suivant la **norme NF EN18-459 (2010)** [68].

Les mesures ont été effectuées après conservation des éprouvettes (4x4x16) cm³ dans l'eau à température ambiante jusqu'à l'échéance de 28 jours. Cette mesure simple, praticable sur une large variété de pattes de ciment, mortiers ou bétons, est considérée comme un paramètre de premier ordre dans l'évaluation et la prévision de la durabilité. C'est en effet un indicateur de la qualité du matériau. L'essai comprend les étapes suivantes :

- **Pesée hydrostatique** : Cette pesée s'effectue en immergeant complètement l'éprouvette à l'aide d'une balance hydrostatique (précision 0.01g) pour obtenir M_{eau} de l'éprouvette immergée dans l'eau.
- **Pesée à l'air** : Après la pesée à l'eau, il faut essuyer rapidement superficiellement l'éprouvette avec un chiffon sec sans toutefois retirer l'eau des pores. Ensuite peser immédiatement l'éprouvette à l'air à 0.01 g près. On obtient de cette manière, la masse M_{air} de l'éprouvette imbibée.
- **Pesée à sec** : S'effectue par étuvage de l'échantillon à une température de $105 \pm 5^\circ\text{C}$ jusqu'à stabilisation de la masse, c'est-à-dire lorsque deux pesées consécutives espacées de 24 heures ne diffèrent pas de plus de 0.05%. La masse ainsi déterminée est la masse de l'éprouvette sèche M_{sec} .

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

$$P = \frac{M_{\text{air}} - M_{\text{sec}}}{M_{\text{air}} - M_{\text{eau}}} \quad (2.6)$$

M_{air} : Masse de l'échantillon imbibé d'eau et essuyé

M_{eau} : Masse de l'échantillon imbibé d'eau.

M_{s} : Masse de l'échantillon sec après passage à l'étuve à 105°C .



Figure II. 22: Balance hydrostatique

II.4.4.6 Essai d'absorption d'eau par capillarité

L'essai d'absorption capillaire a été réalisé conformément au mode opératoire de **la norme européenne EN 13057 (2002)** [69] et consiste à déterminer la quantité d'eau absorbée par le mortier en fonction du temps. Le taux d'absorption par remontée capillaire due à la force de succion d'une éprouvette. Puis on procède à de relevés de masse successifs à l'aide d'une balance de précision de 0,01g sur des intervalles de temps très courts au début puis de plus en plus espacés au fur et à mesure que l'on avance dans l'expérience (0 min, 4min, 9min, 16min, 25min, 36min, 49min, 1h, 2h, 3h, 24h). À chaque échéance, les éprouvettes sont sorties du récipient, à l'aide d'une éponge humide, pesées puis replacées dans le récipient.

Pour une échéance donnée, l'absorption capillaire est exprimée en grammes par millimètre carré (g/mm²), par la formule suivante :

$$C_A = \frac{M_J - M_0}{S} \quad (2.7)$$

M₀: Masse sèche de l'éprouvette avant immersion dans l'eau en gramme.

M_J: Masse de la même éprouvette après le temps requis d'absorption en grammes.

S : Section de la base de l'éprouvette en millimètre carré, c'est-à-dire 1600mm².

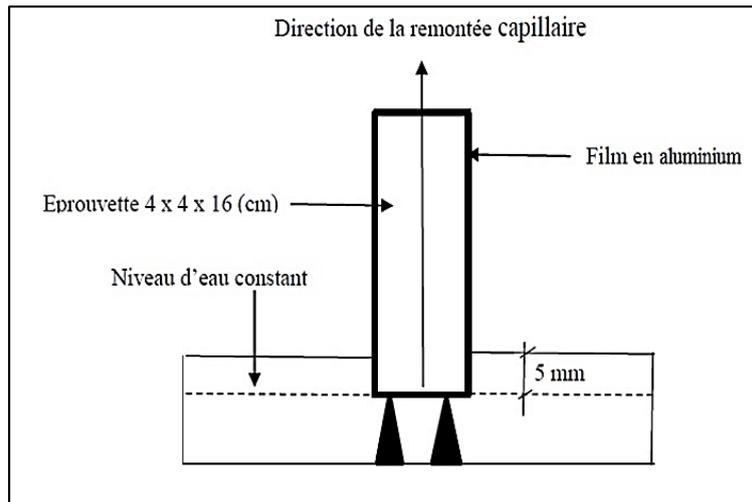


Figure II. 23: Schéma du dispositif expérimental



Figure II. 24: Essai d'absorption d'eau par capillarité

II.4.4.7 Essai de durabilité

Dans le but de tester la résistance des nouveaux ciments vis-à-vis l'agression des milieux agressifs, nous avons émergé les éprouvettes préparées après 28 jours de conservation dans l'eau potable dans une solution d'acide sulfurique de concentration 5%, la solution est renouvelée chaque 15 jours.

D'autres éprouvettes ont été conservées dans de l'eau distillée pour faire la comparaison.



Figure II. 25: Conservation des éprouvettes dans l'eau distillée et Acide et l'acide sulfurique

II.4.5 Essais de caractérisations mécaniques

Nous avons étudié la résistance à la compression et à la flexion des éprouvettes de mortier normal de forme prismatique (4.4.16) cm³ fait à partir des échantillons des ciments élaborés.

Equipements nécessaires :

L'ensemble est décrit de manière détaillée par la Norme EN196-1. Il est mentionné ci-dessous :

- Une salle maintenue à une température de $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ et à une humidité relative supérieure ou égale à 50 %.
- Une chambre ou une armoire humide maintenue à une température de $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ et une humidité relative supérieure 90 %.
- Un malaxeur normalisé.
- Des moules normalisés permettant de réaliser 3 éprouvettes prismatiques de section carrée 4 cm x4 cm et de longueur 16 cm (ces éprouvettes sont appelées éprouvettes (4x4x16)).
- Un appareil à chocs permettant d'appliquer 60 chocs aux moules en faisant chuter d'une hauteur de $15 \text{ mm} \pm 0.3 \text{ mm}$ à la fréquence d'une chute par seconde pendant 60 s.
- Une machine d'essai de résistance à la flexion et à la compression.

Conduite de l'essai :

La Norme NA234 décrit de manière détaillée le mode opératoire concernant cet essai. Après 24 heures de séchage dans la chambre humide à une température de $20 \pm 1^{\circ}\text{C}$, les échantillons sont démoulés et conservés dans une atmosphère saturée dans la chambre humide

pendant respectivement 28, 60 jours. A l'âge d'essai, les éprouvettes sont soumises à l'écrasement par flexion en suite, les demi-éprouvettes obtenues sont soumises à l'essai de résistance à la compression. On signalera toutefois que la valeur obtenue pour chaque échantillon ciment est une moyenne de 3 essais.

Les essais devront être réalisés dans les limites de temps indiquées dans le Tableau suivant :

Tableau II. 7: Limite de temps [70]

Age	24 h	48 h	72 h	7 j	28 j
Précision	± 15 min	± 30 min	± 45 min	± 2 h	± 8 h



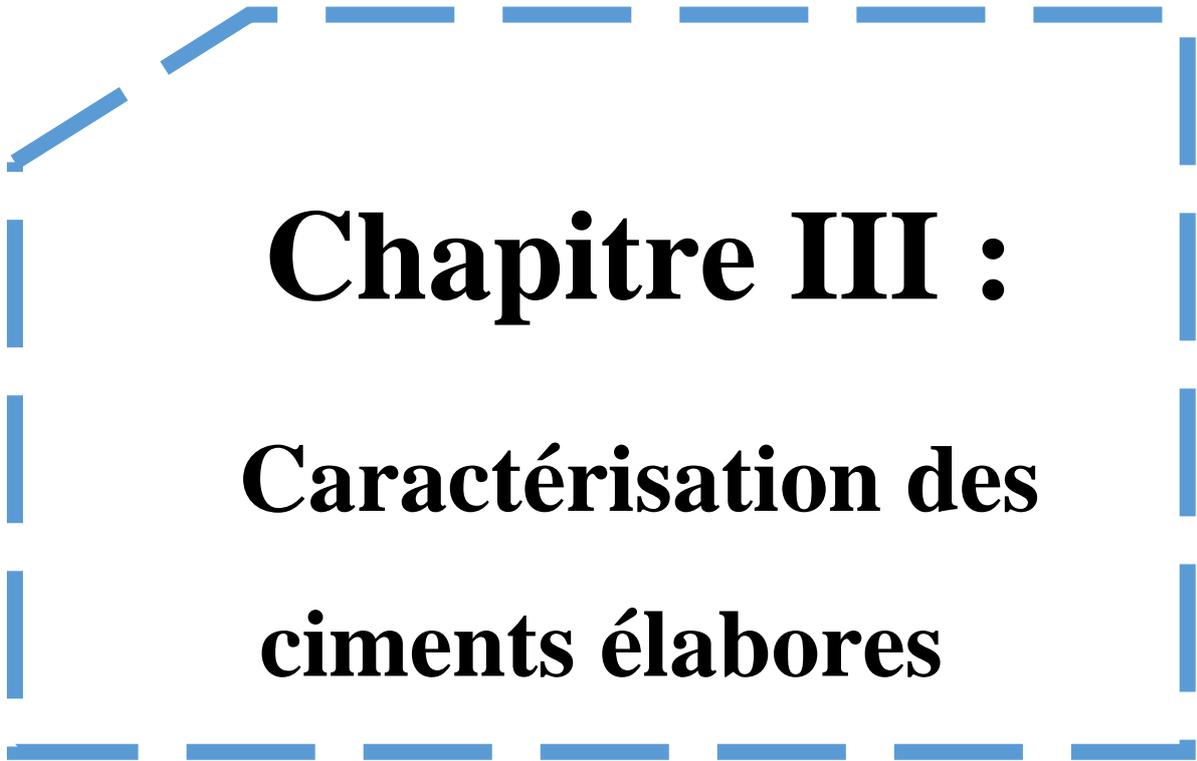
Figure II. 26: Appareil flexion-compression

II.5 Conclusion

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

Des analyses chimiques, des essais physiques et mécaniques ont été réalisés sur les ciments élaborés dans les différents laboratoires (pédagogique de génie civil de l'université 08 Mai 1945 et celui de la cimenterie de hadjar soud).

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



Chapitre III :
Caractérisation des
ciments élaborés

Chapitre III :

Caractérisation des ciments élaborés

III Introduction

Dans ce chapitre, nous allons présenter les résultats obtenus après avoir réalisé l'ensemble des essais de caractérisation chimique, physique et mécanique mentionnées dans le deuxième chapitre. Les résultats trouvés seront exposés, discutés et comparés avec un échantillon de référence (Ciment Portland). Les essais réalisés ont été conduits conformément aux normes sur les ciments en vigueur en Algérie.

III.1 Résultats des essais réalisés

Pour la préparation des échantillons du ciment, nous avons procédé à un broyage et à un tamisage séparé des matières premières (CEM I, poudre Gel de Silice et cendre des grignons d'olive). Après dosage, les échantillons de ciment ainsi élaborés sont homogénéisés et soumis aux essais.

III.1.1 Caractérisation des ciments élaborés

Après homogénéisation (malaxage), nous avons élaborés six échantillons de ciment et un échantillon de référence CEM I/42.5 R. Ces derniers seront caractérisés chimiquement, physiquement et mécaniquement.

III.1.1.1 Caractérisation chimique

La détermination des constituants chimiques des ciments élaborés a été faite par :

III.1.1.1.1 Fluorescence X

Les résultats de cette analyse sont reportés dans les Tableaux suivants :

Tableau III. 1: a) Teneur en oxyde des échantillons de cendre d'olive (teneur moyenne en masse) / **b)** Teneur en oxyde des échantillons de Gel de Silice

a)

Echantillons	CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	l ⁻	SO ₃
CEM I	63.96	5.06	3.70	19.86	2.30	0.28	0.71	0.035	3.09
E10	62.59	4.89	3.66	19.07	2.24	0.28	0.92	0.056	2.95
E20	60.69	4.69	3.60	18.15	2.15	0.27	1.17	0.080	2.94
E30	59.30	4.54	3.58	17.45	2.06	0.27	1.44	0.107	2.98

b)

Echantillons	CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	Cl ⁻	SO ₃
CEM I	63.96	5.06	3.70	19.86	2.30	0.28	0.71	0.035	3.09
E2.5	62.70	5.01	3.42	20.24	2.42	0.27	0.70	0.034	3.21
E5	62.83	5.04	3.46	20.91	2.47	0.27	0.69	0.033	3.11
E7.5	64.76	5.08	3.75	22.56	2.86	0.22	0.70	0.036	3.34

D'après le **Tableau III.1-a**, on constate que, avec l'augmentation des proportions de cendre des grignons d'olive, une diminution de la teneur en silice SiO₂, en magnésium MgO et dans la teneur en oxyde de calcium CaO (3%), une augmentation du K₂O (double pour 30% d'ajout en cendre d'olive) et pour les valeurs des alcalins Na₂O sont quasiment constantes.

Concernant le **Tableau III.1-b**, on remarque que l'augmentation du pourcentage de la poudre de Gel de Silice dans les ciments élaborés présentent une croissance de la teneur en silice et oxyde de calcium, en magnésium. La valeur de Na₂O diminuer pour l'échantillon qui contient 7.5% de la poudre de Gel de Silice et pour les autres pourcentages est presque fixe.

Réglementairement, et selon les prescriptions de **La norme NA442** [71], la teneur en oxyde de magnésium est limitée à 5%, la teneur en sulfate SO₃ est limitée à 3.5%, ces conditions sont vérifiées pour l'ensemble des ciments élaborés.

III.1.1.1.2 Teneur en (CaO) libre et en perte au feu (PAF)

Après avoir mesuré la CaO libre et la perte au feu des différents échantillons, on a présenté les résultats trouvés dans les tableaux suivants :

Tableau III. 2: a) Teneur en (CaO) libre et en PAF des échantillons de cendre d'olive / b) Teneur en (CaO) libre et en PAF des échantillons de Gel de Silice

a)

Echantillons	CEM I	E10	E20	E30
CaO _{Libre}	0.20	0.03	0.03	0.03
PAF	2.25	6.77	10.74	15.38

b)

Echantillons	CEM I	E2.5	E5	E7.5
CaO _{Libre}	0.20	0.16	0.09	0.07
PAF	2.25	2.84	2.89	2.74

D'après les **Tableaux III.2** :

- Il paraît que la teneur en CaO libre reste constante à 0.03% pour toutes proportions de cendre des grignons d'olive dans le ciment. Cela pourrait indiquer un équilibre dans la réaction chimique impliquée. D'un autre côté, on observe que l'ajout de poudre de Gel de Silice au ciment portland réduit efficacement la teneur en CaO libre par rapport au ciment de référence. Cette réduction augmente avec l'augmentation de la quantité de Gel de Silice ajoutée.

- La PAF de l'échantillon de base et des ciments qui contient des différents pourcentages de Gel de Silice reste toujours dans l'intervalle préconisé par **La norme NA442** [71], par contre les ciments élaborés à base de cendre des grignons d'olive offrent un excès dans la perte au feu, ce qui indique une plus grande proportion de matières organiques et volatiles dans les ciments, qui se volatilisent à haute température ce que nous ne pouvions pas atteindre avec le poêle à gaz.

III.1.1.1.3 Indice d'hydraulicité

L'indice d'hydraulicité ou indice de Vicat est défini comme étant le rapport de la fraction acide à la fraction basique du ciment.

$$I = \left[\frac{\text{Fraction acide}}{\text{Fraction basique}} \right] = \left[\frac{\text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3}{\text{CaO} - \text{MgO}} \right] \quad (3.1)$$

Le calcul des indices d'hydraulicités est indiqué dans les Tableaux III.4.

Tableau III. 3: a) Indice d'hydraulicité des ciments élaborés à base de cendre des grignons d'olive/ b) Indice d'hydraulicité des ciments élaborés à base de Gel de Silice

a)

Echantillons	CEM I	E10	E20	E30
I	0.24	0.23	0.23	0.22

b)

Echantillons	CEM I	E2.5	E5	E7.5
I	0.24	0.25	0.26	0.28

Pour classer les ciments selon leur résistance chimique, on doit calculer les valeurs de l'indice d'hydraulicité. Ainsi on distingue [12] :

- Les ciments basiques (ce sont généralement les ciments portland), pour lesquels $I \leq 0.5$.
- Les ciments neutres (riches en laitier) pour lesquels $I > 0.5$.
- Les ciments acides pour lesquels $I = 1.7$

A partir de la classification citée précédemment, on peut conclure que tous les ciments préparés peuvent être classés comme des ciments basiques ($I \leq 0.5$).

III.1.1.2 Caractérisation physique

Nos ciments présentent les caractéristiques physiques suivantes :

III.1.1.2.1 Masses volumiques des ciments

Les mesures expérimentales des masses volumiques des ciments élaborés sont reportées dans les Tableaux III.4.

Tableau III. 4 : a) Masses volumiques des ciments élaborés à base de cendre des grignons d'olive / b) Masses volumiques des ciments élaborés à base de la poudre de Gel de Silice

a)

Echantillons	CEM I	E10	E20	E30
M.V apparente (g/cm ³)	963.18	948.86	939.79	901.55
M.V absolue (g/cm ³)	3.15	2.927	2.80	2.655

b)

Echantillons	CEM I	E2.5	E5	E7.5
M.V apparente (g/cm ³)	963.18	928.29	919.23	921.71
M.V absolue (g/cm ³)	3.15	3.08	3.03	2.97

On observe d'après les **Tableaux III.4** que les ciments composés présentent des masses volumiques (apparentes et absolues) inférieures à celles enregistré par l'échantillon de référence.

On peut expliquer ce comportement par le fait que la masse volumique de l'échantillon de référence est supérieur au celle des masses volumiques des déchets utilisées.

III.1.1.2.2 La finesse

La méthode par tamisage sert uniquement à détecter la présence de grosses particules de ciment. Cette méthode d'essai est avant tout appropriée à la vérification et au contrôle du procédé de production. Les résultats sont indiqués dans les Tableaux III.5.

Tableau III. 5: a) La finesse des ciments élaborés à base de cendre des grignons d'olive/ b) La finesse des ciments élaborés à base de Gel de Silice

a)

Echantillons	CEM I	E10	E20	E30
Finesse (%)	2.33	3.69	4.88	6.02

b)

Echantillons	CEM I	E2.5	E5	E7.5
Finesse (%)	2.33	1.92	1.87	1.85

D'après le **Tableau III.5-a**, on constate que le refus du tamis 45 μm augmente en augmentant le pourcentage de la cendre. Ce résultat est en concordance avec les résultats de la finesse SSB. Cette augmentation est justifiée par l'utilisation du tamisât du tamis 100 μm lors de la préparation de la poudre. Par contre selon le **Tableau III.5-b**, l'ajout de la poudre de cilice obtenue par le tamisât du tamis 80 μm donne des refus moindres. Ce qui est bénéfique pour les propriétés mécaniques et de durabilité des ciments et des bétons.

III.1.1.2.3 Surface spécifique de Blaine (SSB) des ciments élaborés

Le broyage est une opération consistant à diviser un solide, pour augmenter sa surface spécifique (surface développée de la poudre par unité de masse) et donc sa réactivité chimique. La surface spécifique de Blaine est mesurée par comparaison avec un échantillon d'un ciment de référence. Les mesures de la **SSB** des ciments élaborés sont regroupées dans les Tableaux III.6.

Tableau III. 6: a) Surface spécifique de Blaine des échantillons de cendre des grignons d'olive / **b)** Surface spécifique de Blaine des échantillons de Gel de Silice

a)

Echantillons	CEM I	E10	E20	E30
SSB (cm^2/g)	3470	3296	3000	2647

b)

Echantillons	CEM I	E2.5	E5	E7.5
SSB (cm^2/g)	3470	3390	3296	3220

On remarque que la surface spécifique Blaine des ciments élaborés varie d'un échantillon à l'autre par une diminution pour les échantillons de cendre et de poudre de silice, cela est dû

du fait que la finesse du ciment CEMI utilisé est supérieure à celle des poudres de cendre (tamisât du tamis 100µm) et de Gel de Silice (tamisât du tamis 80µm) utilisés.

III.1.1.2.4 La consistance normale

L’essai de consistance normale a été réalisé selon **la norme NA 229** [72].

La consistance normalisée d’une pâte de ciment est nécessaire pour déterminer les temps de début et de fin de prise. La variation de la demande en eau pour les différents échantillons de ciment en fonction de la teneur en ajouts est regroupée dans les tableaux ci-dessous.

Tableau III. 7: a) Consistance normale des ciments élaborés à base de cendre des grignons d’olive / b) Consistance normale des ciments élaborés à base de Gel de Silice

a)

Echantillons	CEM I	E10	E20	E30
Consistance%	29.4	32.3	35.2	42.0

b)

Echantillons	CEM I	E2.5	E5	E7.5
Consistance	29.4	29.8	30.2	30.4

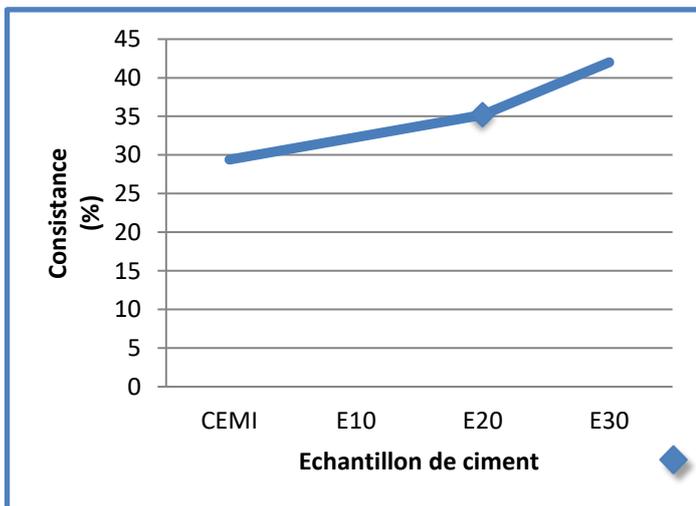


Figure III. 1-a

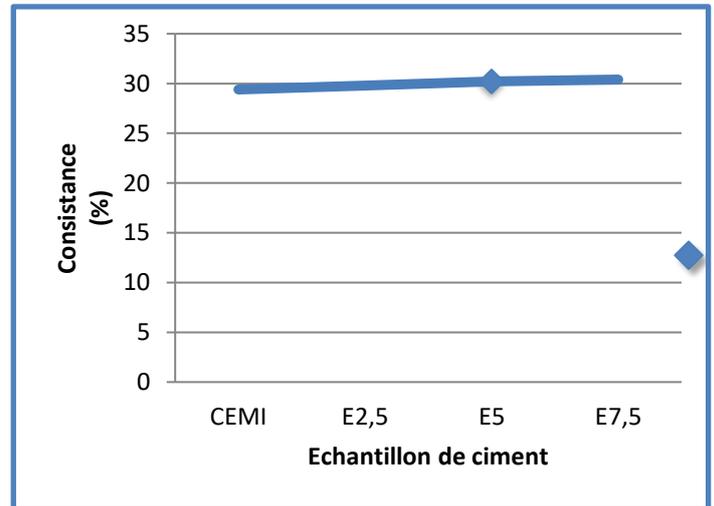


Figure III. 1-b

Figure III. 1 : a) Variation de la consistance en fonction du pourcentage de la cendre des grignons d’olive/ b) Variation de la consistance en fonction du pourcentage de la poudre de Gel de Silice

D'après les graphes indiqués sur les **Figures III.1-a** et **3.1-b**, le rapport (E/C) de la consistance normale augmente dans tous les ciments élaborés à partir de 29.4% pour le ciment de référence à 42% pour les échantillons de cendre et de 29.4% à 30.4% pour les échantillons de la poudre de Gel de Silice.

On remarque que les échantillons riches en Gel de Silice nécessitent des quantités d'eau moins que les autres échantillons de cendre qui absorbe une quantité d'eau plus importante à cause de la teneur en CaO élevée.

III.1.1.2.5 Temps de prise

La détermination du temps de début et de fin de prise est effectuée sur des pâtes fraîches de ciments maintenus à la température ambiante du laboratoire ($21\pm 1^\circ\text{C}$). Les résultats obtenus sont regroupés dans les Tableaux III.8.

Tableau III. 8: a) Temps de prise des ciments élaborés à base de cendre des grignons d'olive / b) Temps de prise des ciments élaborés à base de poudre de Gel de Silice

a)

Echantillons	CEM I	E10	E20	E30
Début de prise (Heurs)	3,32	3,17	3,15	3,09
Fin de prise (Heurs)	5,25	4,95	4,67	4,17

b)

Echantillons	CEM I	E2.5	E5	E7.5
Début de prise (Heurs)	3,32	3,01	2,87	2,73
Fin de prise (Heurs)	5,25	5,01	5,11	5,21

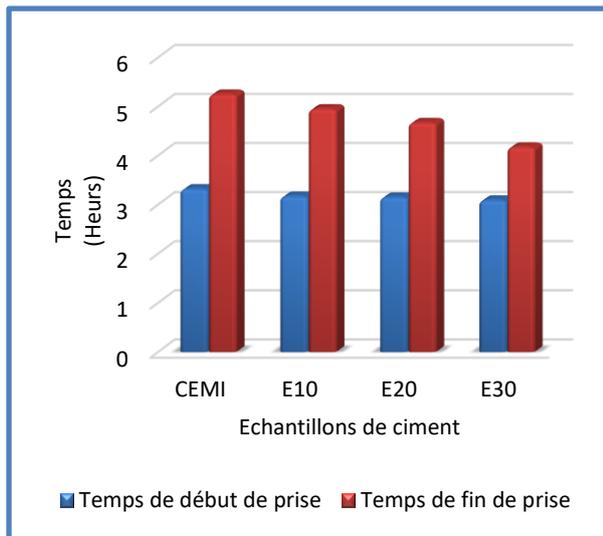


Figure III.2-a

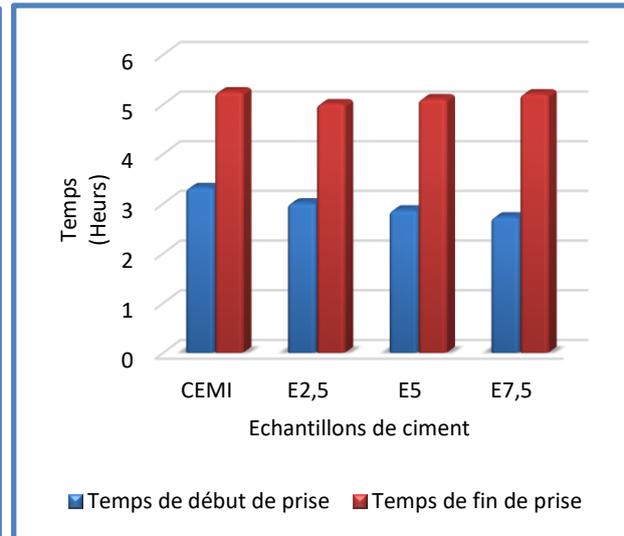


Figure III.2-b

Figure III. 2: a) Résultats de temps de prise des ciments élaborés à base de cendre des grignons d'olive / b) Résultats de temps de prise des ciments élaborés à base de la poudre de Gel de Silice

D'après les **Tableaux III.8** et les Figures qui les suivent, on remarque que la plupart des échantillons ont enregistré des temps de début de prise proches. Le temps de fin de prise est aussi proche pour les ciments à base de Gel de Silice. Tandis qu'il varie d'un échantillon à un autre pour le ciment élaboré avec de la cendre d'olive. La différence entre le temps de début et celui de fin de prise varie entre une heure pour les ciments à bases de cendre et de deux heures et demie pour les ciments à base de Gel de Silice.

Les valeurs trouvées sont dans l'intervalle préconisé par **la norme NA 442** [71] qui est estimée supérieur ou égale à 75 min. Il semble que la contribution de la cendre des grignons d'olive est plus importante que la poudre de Gel de Silice dans l'accélération du temps de prise.

III.1.1.3 Essai sur mortier normalisé

III.1.1.3.1 Masse volumique des mortiers à l'état frais et à l'état durci

La mesure de la masse volumique à l'état frais et à l'état durcis a réalisée selon **la norme NF EN 1015-6** et **la norme NF EN 1015-10** respectivement [73].

Les résultats obtenus sont regroupés dans les Tableaux III.9 :

Tableau III. 9: a) Masse volumique apparente des mortiers des ciments à base de la cendre à l'état frais et à l'état durci / b) Masse volumique apparente des mortiers des ciments à base de la poudre à l'état frais et à l'état durci

a)

Echantillons	CEM I	E10	E20	E30
M.V à l'état frais (g/cm ³)	2.34	2.19	1.71	1.65
M.V à l'état durci (g/cm ³)	2.31	2.21	2.19	2.18

b)

Echantillons	CEM I	E2.5	E5	E7.5
M.V à l'état frais (g/cm ³)	2.34	2.30	2.32	2.34
M.V à l'état durci (g/cm ³)	2.31	2.31	2.29	2.28

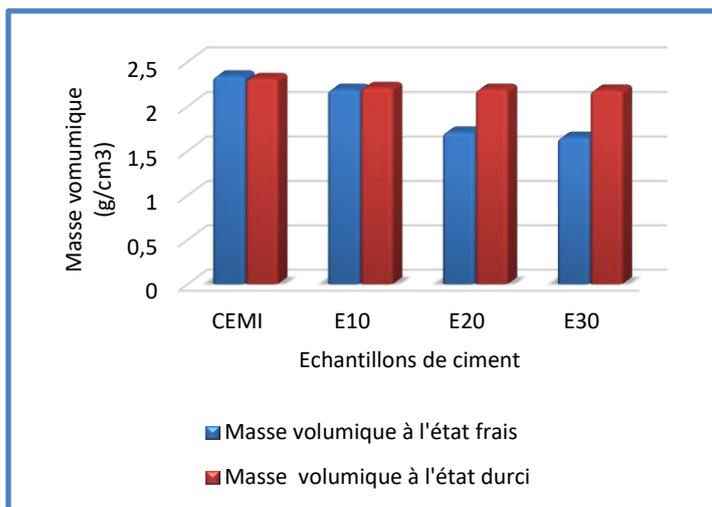


Figure III.3-a

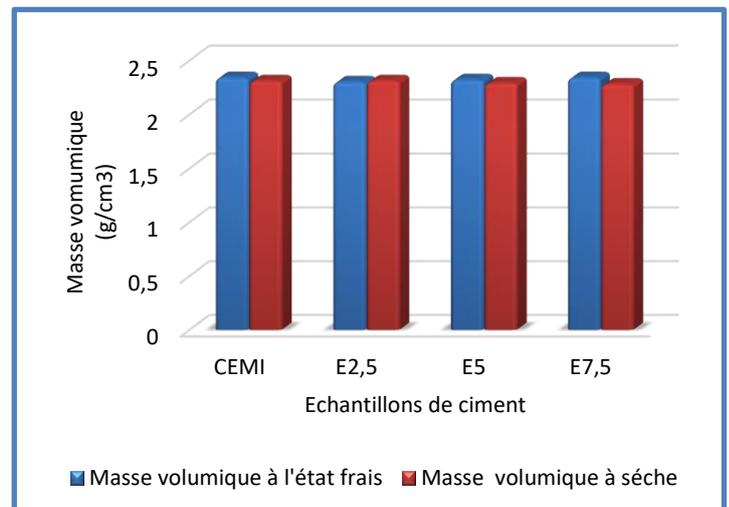


Figure III.3-b

Figure III. 3: a) Masse volumique apparente des mortiers des ciments à base de la cendre des grignons d'olive / b) Masse volumique apparente des mortiers des ciments à base de la poudre de Gel de Silice

La **Figure III.3-a** montre que l'ajout de cendre des grignons d'olive au ciment portland réduit la masse volumique à l'état frais et à l'état durci avec réductions proportionnelles à la quantité de cendre ajoutée.

La **Figure III.3-b** montre que l'ajout de poudre de Gel de Silice au CEM I n'a qu'un effet minime sur la masse volumique à l'état frais et à sec, les variations observées sont faibles.

On peut attribuer ces résultats à la densité inférieure des ajouts utilisés par rapport au ciment portland.

III.1.1.3.2 Etalement

L'essai d'étalement a été réalisé selon **la norme EN 1015-3** [66]. Cet essai permet d'évaluer la maniabilité des mortiers normalisés préparés avec les nouveaux ciments. Les résultats de cet essai sont illustrés dans les Tableaux III.10.

Tableau III. 10: a) Test d'étalement des mortiers normalisés de ciments contient la cendre des grignons d'olive / b) Test d'étalement des mortiers normalisés de ciments contient la poudre de Gel de Silice

a)

Echantillons	CEM I	E10	E20	E30
D ₁ (cm)	20.50	19.50	18.20	18
D ₂ (cm)	19.50	20	18.50	18
F (cm)	20	19.75	18.35	18

b)

Echantillons	CEM I	E2.5	E5	E7.5
D ₁ (cm)	20.50	20	19.70	18.90
D ₂ (cm)	19.50	20	19.80	19.50
F (cm)	20	20	19.75	19.20

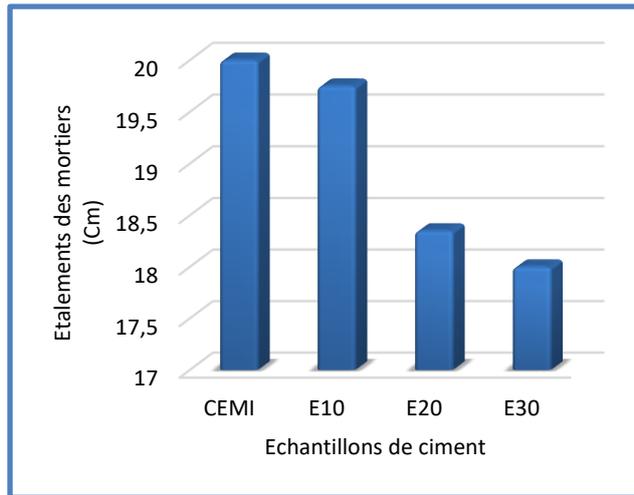


Figure III.4-a

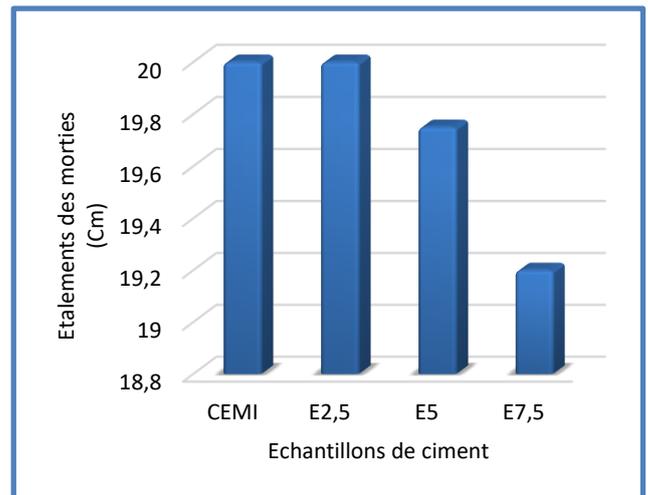


Figure III.4-b

Figure III. 4: a) Valeurs d'étalement des mortiers étudiés à base de la cendre des grignons d'olive / b) Valeurs d'étalement des mortiers étudiés à base de la poudre de Gel de Silice

La **Figure III.4-a** montre que l'ajout des cendres des grignons d'olive engendre une diminution de la valeur d'étalement en fonction de l'augmentation des pourcentages ajoutés au CEM I mais le diamètre de l'étalement reste dans les normes. Cette diminution peut être dû à la demande en eau plus élevée des cendres des grignons d'olive en raison de la texture et la forme irrégulière des particules et sa porosité ainsi à la teneur en matière organique (les grignons d'olive n'ont pas calciné à 100%).

Pour La **Figure III.4-b**, on observe qu'avec l'ajout de 2.5% de Gel de Silice, l'étalement est pratiquement identique au ciment de référence. Cela indique que cette faible quantité de Gel de Silice n'affecte pas significativement la fluidité du ciment. Avec l'augmentation de la proportion de Gel de Silice au-delà de 2.5%, la fluidité du ciment diminue.

D'après la **norme NF EN 1015-6** [73], l'ensemble des mortiers préparés sont des mortiers plastiques ($F \leq 200$ mm).

III.1.1.3.3 Absorption d'eau par immersion totale

Après séchage jusqu'à masse constante puis émergence des éprouvettes dans l'eau pendant 48h on a obtenu les pesés représentées dans les Tableaux III.11 :

Tableau III. 11: a) Valeurs de l'absorption par immersion totale des échantillons de cendre des grignons d'olive / b) Valeurs de l'absorption par immersion totale des échantillons de poudre de Gel de Silice

a)

Echantillons	CEM I	E10	E20	E30
M_{seche} (g)	560.9	537.1	532.95	533.95
M_{sat} (g)	606	583.55	576.45	579.75
A_b (%)	8.04	8.65	8.17	8.58

b)

Echantillons	CEM I	E2.5	E5	E7.5
M_{seche} (g)	560.9	554.65	548.5	546.05
M_{sat} (g)	606	594.8	593.7	590.75
A_b (%)	8.04	7.24	8.24	8.19

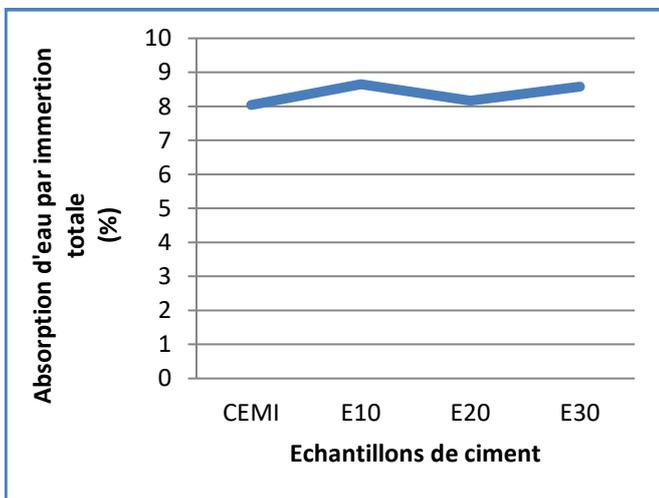


Figure III. 5-a

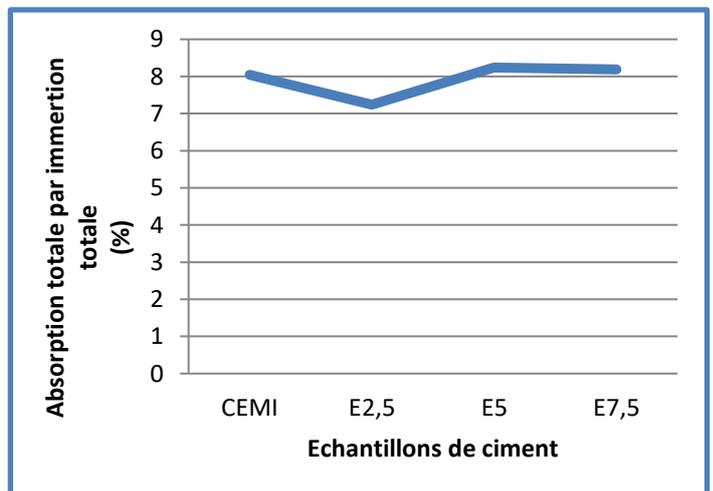


Figure III. 5-a

Figure III. 5: a) Valeurs de l'absorption par immersion totale pour les mortiers formuler des ciments de la cendre des grignons d'olive / b) Valeurs de l'absorption par immersion totale pour les mortiers formuler des ciments de la poudre de Gel de Silice

D'après la **Figure III.5-a**, le taux d'absorption augmente légèrement avec l'ajout de cendre des grignons d'olive, cela pourrait être due à la porosité additionnelle introduite par la cendre, permettant une plus grande absorption d'eau.

Pour l'effet de la poudre de Gel de Silice sur l'absorption du ciment est de réduction initiale à 2.5% de la poudre, indiquant que cette faible proportion de Gel de Silice réduisant la capacité d'absorption d'eau. L'ajout de 5% et 7.5% de Gel de Silice entraîne une augmentation de l'absorption, dépassant même celle du CEM I pour 5% d'ajout.

Une augmentation de l'absorption d'eau peut indiquer une perméabilité plus élevée, ce qui peut affecter la durabilité du ciment, particulièrement dans des environnements humides ou exposés à des cycles de gel-dégel.

III.1.1.3.4 Porosité accessible à l'eau

Nous avons rassemblé les résultats des mesures de la porosité accessible à l'eau pour les différents échantillons des ciments élaborés dans les Tableaux III. 12 Et les Figures III. 6.

Tableau III. 12: a) Porosité accessible à l'eau des ciments élaborés à base de cendre des grignons d'olive en (%) / b) Porosité accessible à l'eau des ciments élaborés à base de poudre de Gel de Silice en (%)

a)

Echantillons	CEM I	E10	E20	E30
M_{eau}	344.3	319.6	312.25	314.75
M_{air}	606	583.55	576.45	579.75
M_{seche}	560.90	537.10	532.95	533.95
Porosité (%)	17.23	17.60	15.87	17.28

b)

Echantillons	CEM I	E2.5	E5	E7.5
M_{eau}	344.3	336.95	334.85	333.20
M_{air}	606	594.80	593.70	590.75
M_{seche}	560.90	554.65	548.5	546.05
Porosité (%)	17.23	15.57	17.46	17.36

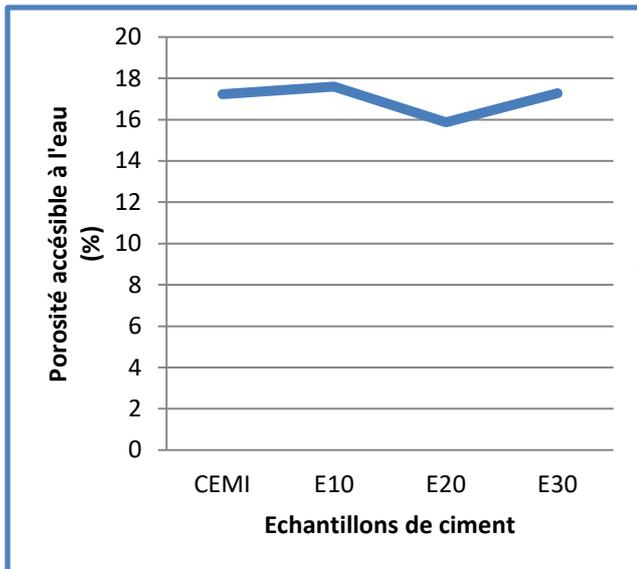


Figure III.6-a

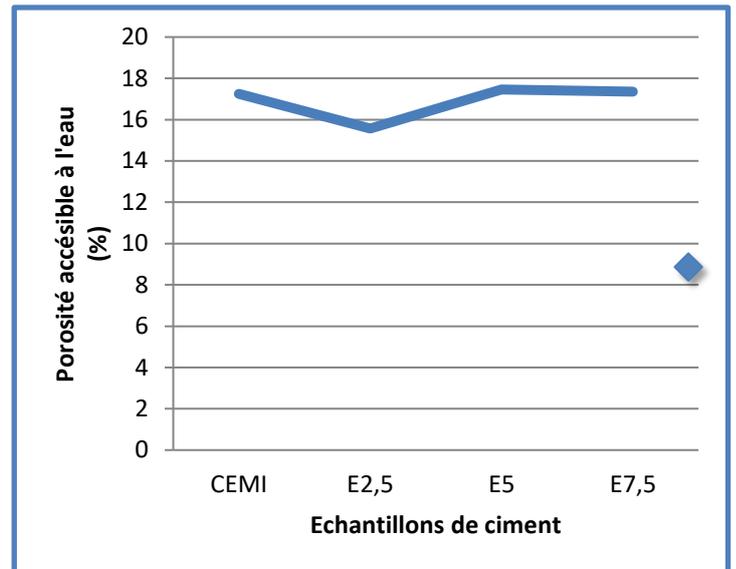


Figure III.6-b

Figure III. 6: a) Valeurs de porosité accessible à l'eau des ciments à base de cendre des grignons d'olive / b) Valeurs de porosité accessible à l'eau des ciments à base de poudre de Gel de Silice

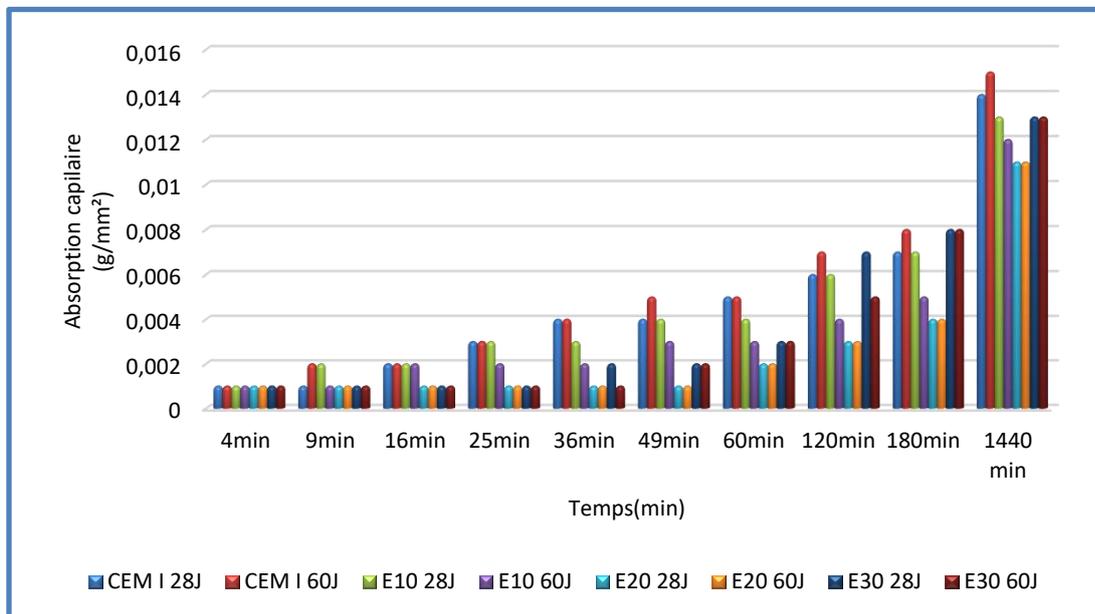
On observe que la porosité accessible à l'eau suit la même allure de variation que l'absorption pour toutes les mortiers testés. On enregistre ainsi qu'une proportion de 20% de cendre semble favorable pour réduire la porosité. En revanche, les proportions plus élevées de Gel de Silice augmentent la porosité, ce qui peut influencer la durabilité et la résistance de ciment, un pourcentage de 2.5% de Gel de Silice semble être la plus favorable pour améliorer les performances du ciment.

III.1.1.3.5 Absorption d'eau par capillarité

L'essai d'absorption capillaire a été réalisé après une conservation des éprouvettes sous l'eau pendant 28 jours et pour évaluer l'effet pouzzolanique des ajouts, on a refait l'essai après 60 jours de conservation. Les résultats obtenus sont reportés dans les Tableaux ci-dessous :

Tableau III. 13: Absorption capillaire des mortiers de ciments de cendre après 28 et 60 jours

Echantillons	Age	4min	9min	16min	25min	36min	49min	60min	120min	180min	1440 min
CEM I	28J	0.001	0.001	0.002	0.003	0.004	0.004	0.005	0.006	0.007	0.014
	60J	0.001	0.002	0.002	0.003	0.004	0.005	0.005	0.007	0.008	0.015
E10	28J	0.001	0.002	0.002	0.003	0.003	0.004	0.004	0.006	0.007	0.013
	60J	0.001	0.001	0.002	0.002	0.002	0.003	0.003	0.004	0.005	0.012
E20	28J	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.002	0.003	0.004	0.011
	60J	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.002	0.003	0.004	0.011
E30	28J	0.001	0.001	0.001	0.001	0.002	0.002	0.003	0.007	0.008	0.013
	60J	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.002	0.003	0.005	0.008	0.013

**Figure III. 7:** Variation de l'absorption capillaire en fonction du temps des mortiers de ciments de cendre après 28 et 60 jours

D'après le **Tableau III. 13** et la **Figure III.7**, on remarque que l'absorption de l'eau par capillarité augmente en fonction du temps tout le long de l'essai (jusqu'à 1440min). On remarque aussi que l'échantillon de référence CEMI a enregistré la plus grande capillarité par rapport aux autres ciments composés à base de la cendre depuis l'âge de 28 jours de conservation. Le même constat est observé après 60 jours. Les échantillons préparés avec 20 et 30% de cendre présentent en générale une capillarité stable entre l'âge de 28 jours et 60 jours, cela peut être expliquer par le fait que ces échantillons ont le même volume des pores depuis l'âge de 28 jours. On observe aussi que les valeurs de l'absorption capillaire mesurée après 60

jours sont plus faibles que celles mesurées à l'âge de 28 jours pour ensemble des ciments contenant la cendre du grignon.

Tableau III. 14: Absorption capillaire des mortiers de ciments de poudre après 28 et 60 jours.

Echantillons	Age	4min	9min	16min	25min	36min	49min	60min	120min	180min	1440 min
CEM I	28J	0.001	0.001	0.002	0.003	0.004	0.004	0.005	0.006	0.007	0.014
	60J	0.001	0.002	0.002	0.003	0.004	0.005	0.005	0.007	0.008	0.015
E2.5	28J	0.002	0.003	0.004	0.005	0.007	0.009	0.010	0.012	0.013	0.019
	60J	0.001	0.002	0.002	0.003	0.003	0.004	0.004	0.005	0.006	0.012
E5	28J	0.002	0.003	0.005	0.006	0.007	0.008	0.008	0.011	0.012	0.021
	60J	0.001	0.002	0.003	0.004	0.004	0.005	0.006	0.007	0.008	0.016
E7.5	28J	0.001	0.002	0.003	0.004	0.005	0.005	0.006	0.008	0.009	0.016
	60J	0.001	0.001	0.002	0.002	0.002	0.003	0.003	0.004	0.004	0.018

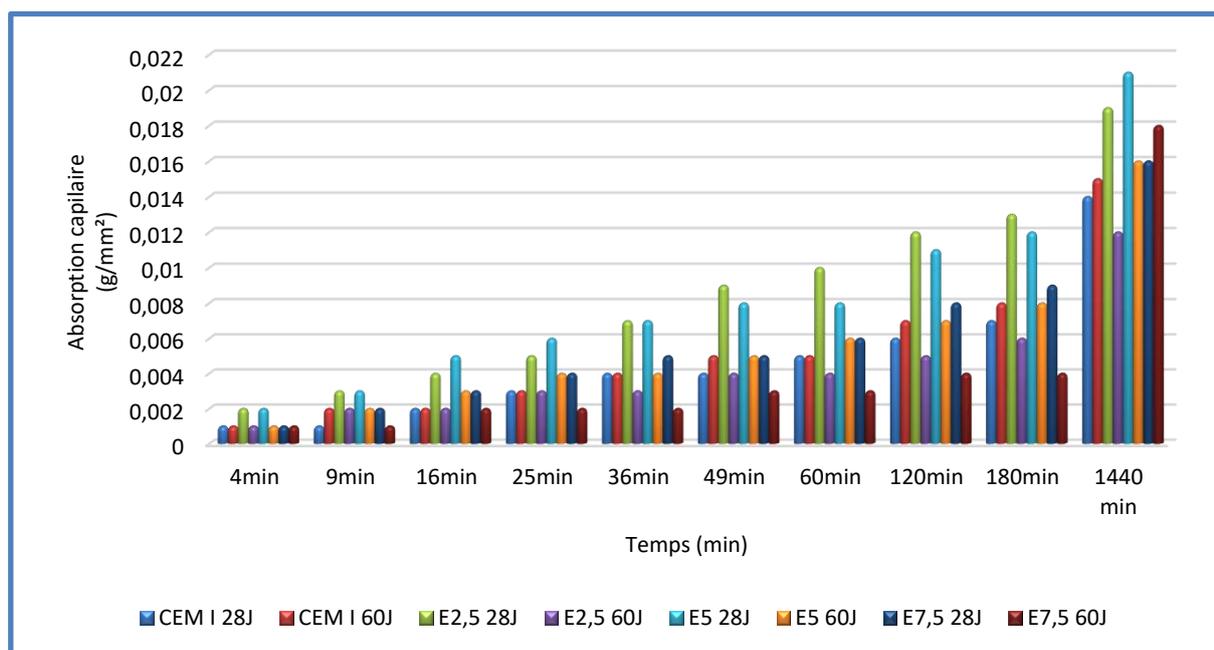


Figure III. 8: Variation de l'absorption capillaire en fonction du temps des mortiers de ciments de la poudre après 28 et 60 jours

La **Figure III.8** illustre la variation de l'absorption capillaire en fonction du temps et en fonction du taux de substitution du CEMI par le gel de silice. D'après cette figure, on remarque que l'absorption augmente en fonction du temps de l'expérience et diminue en fonction du temps de conservation entre 28 et 60 jours.

L'absorption de l'eau par capillarité mesurée à 60 jours est inférieure à celle mesurée après 28 jours. Cette différence augmente en augmentant le pourcentage de la poudre de gel de silice. Ce phénomène est justifié par une diminution de la porosité après 60 jours : raffinement des pores dû à la formation des produits hydratés (C-S-H) formé après la réaction (effet prolongé dans le temps).

III.1.1.3.6 Evaluation de la durabilité des ciments

Pour évaluer la durabilité des ciments élaborés et pour pouvoir refléter l'effet du milieu de conservation sur les échantillons préparés, nous avons immergé des éprouvettes de mortier normalisées dans l'eau distillée et d'autres dans une solution d'acide de concentration 5% (H_2SO_4) pendant une période de 45 jours. A une échéance donnée, les éprouvettes sont pesées. Les résultats obtenus sont reportés dans les tableaux suivants :

Tableau III. 15: Valeurs de la perte en masse des mortiers de ciment de cendre conservé dans l'acide

Echantillons		CEM I	E10	E20	E30
Période de Conservation	15 jours	-1.17	-1.37	-3.6	-2.43
	30 jours	-10.68	-14.92	-16.2	-15.09
	45 jours	-17.92	-23.5	-24.61	-23.85

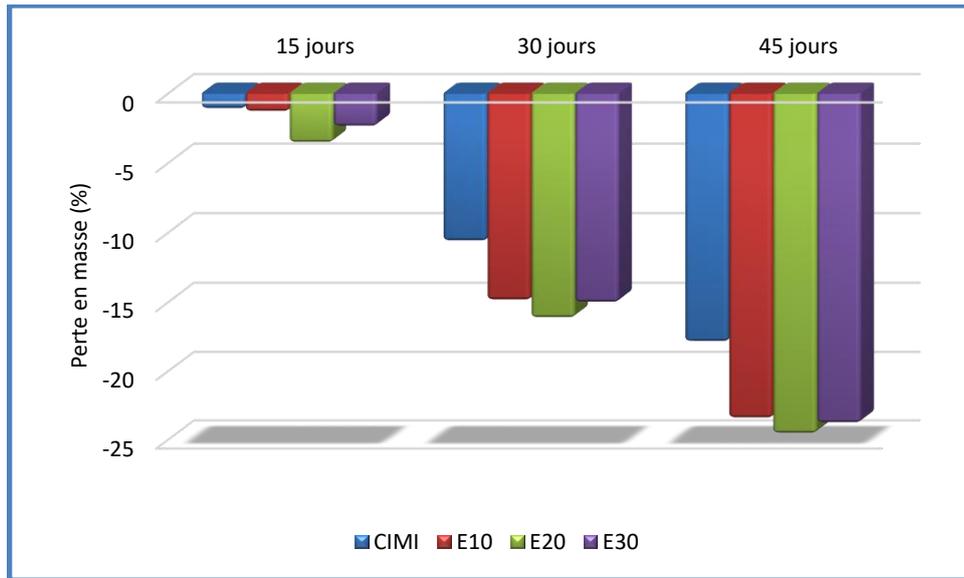


Figure III. 9: la perte en masse des mortiers de ciment de cendre conservé dans l'acide

Selon le **Tableau III. 15** et la **Figure III.9** on remarque que les pertes de masse augmentent avec l'augmentation du temps.

L'échantillon CEMI enregistre des pertes de masse plus faible par rapport à ceux contenant la cendre à cet âge (45 jours) de conservation.

Tableau III. 16: Gain en masse des mortiers de ciment de cendre conservé dans l'eau

Echantillons		CEM I	E10	E20	E30
Période de Conservation	15 jours	7.12	7.84	7.79	8.34
	30 jours	7.19	8.1	8.33	8.64
	45 jours	7.26	8.23	8.51	8.75

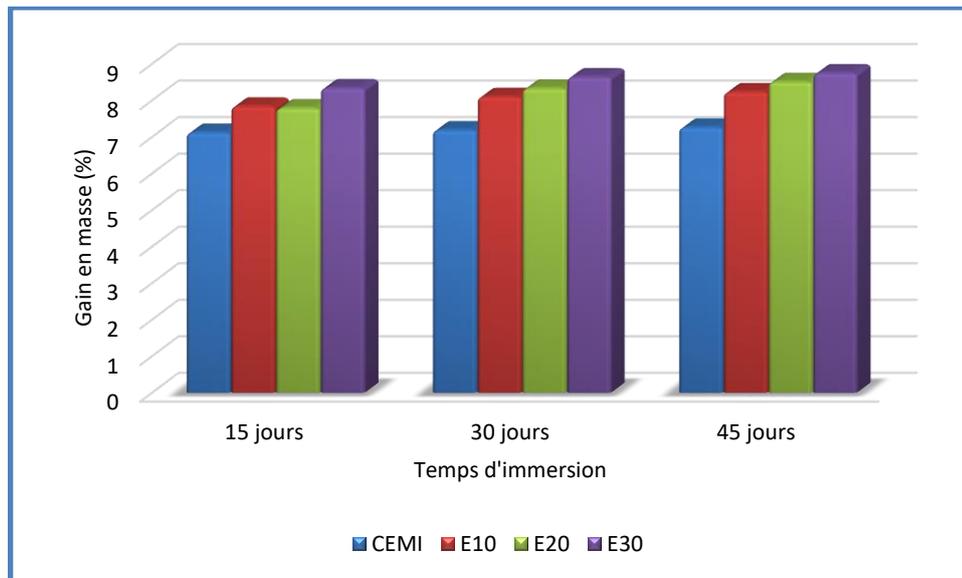


Figure III. 10: Gain en masse des mortiers de ciment de cendre conservé dans l'eau

On constate selon la **Figure III.10** que la masse des éprouvettes augmente en fonction du temps et en fonction de taux d'ajout.

Le CEMI absorbe moins d'eau par rapport aux ciments au cendre. Cela est dû peut-être leurs grandes capacités d'absorption d'eau.

Tableau III. 17: Valeurs de la perte en masse des mortiers de ciment de Gel de Silice conservé dans l'acide

Echantillons		CEM I	E2.5	E5	E7.5
Période de Conservation	15 jours	-1.17	2.42	2.94	2.60
	30 jours	-10.68	-6.44	-8.1	-7.55
	45 jours	-17.92	-15.29	-16.50	-16.86

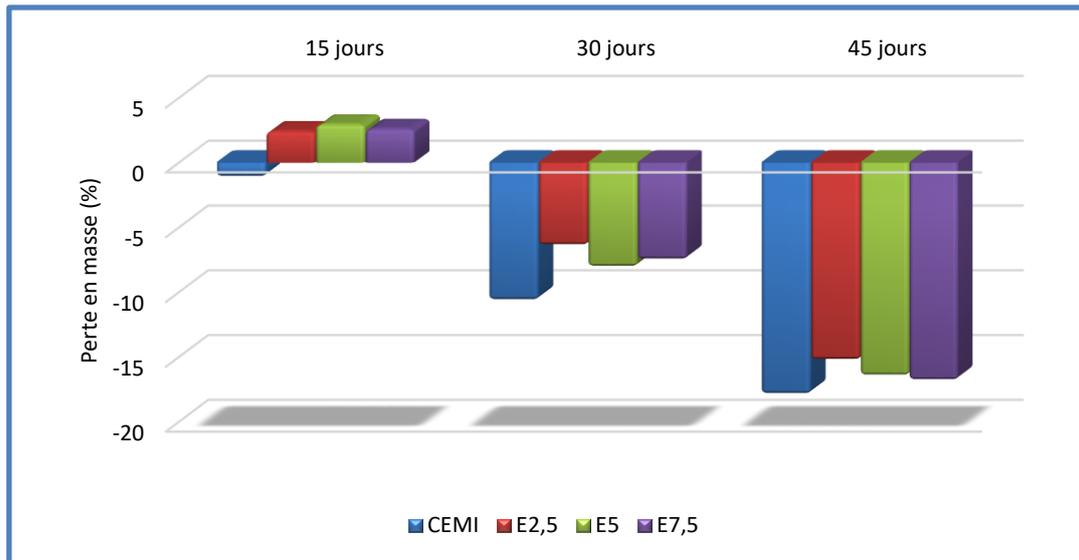


Figure III. 11: la perte en masse des mortiers de ciment de Gel de Silice conservé dans l'acide

Après 15 jours de conservation dans le milieu acide, les ciments au gel de silice ont subi une augmentation de masse, alors que le CEMI a subi une perte de masse.

L'augmentation du temps de conservation conduit à des pertes de masse de plus en plus importante pour l'ensemble des ciments préparés. Les ciments contenant le gel de silice ont enregistré des pertes de masses moindres que le CEMI : la présence de la silice additive a contribué à l'amélioration de la résistance aux agressions extérieures.

Tableau III. 18: Valeurs de la variation en masse des mortiers de ciment de Gel de Silice conservé dans l'eau

Echantillons		CEMI	E2.5	E5	E7.5
Période de Conservation	15 jours	7.12	7.80	7.88	8.06
	30 jours	7.19	8.10	8.17	8.33
	45 jours	7.26	8.46	8.64	9.12

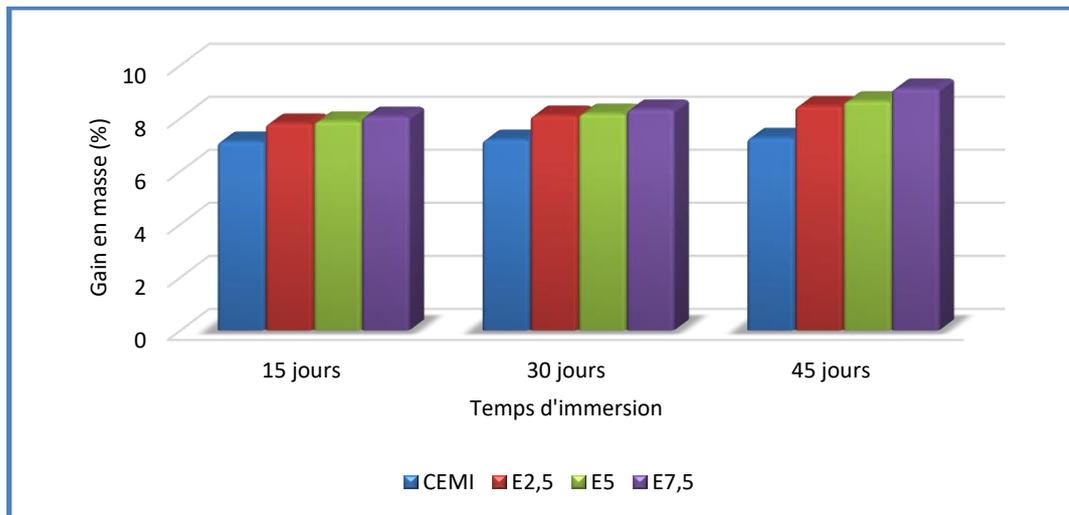


Figure III. 12: Gain en masse des mortiers de ciment de Gel de Silice conservé dans l'eau

Sous l'eau les ciments contenant le gel de silice suivent la même allure de variation que les ciments préparés avec la cendre du grignon.

III.1.1.4 Caractérisations mécaniques

III.1.1.4.1 Résistance mécanique à la compression

Le but de cet essai est de déterminer la classe de résistance des ciments élaborés. Les résultats des essais d'écrasement en compression sont présentés dans les Tableaux III.16.

Tableau III. 19: Résistance à la compression des mortiers de ciments à base de cendre

Echantillons	CEM I	E10	E20	E30
Résistance à 2jrs (MPa)	25.57	19.22	20.60	17.59
Résistance à 7jrs (MPa)	41.28	30.82	30.87	28.02
Résistance à 28 jrs (MPa)	58.05	40.85	37.80	34.65
Résistance à 60 jrs (MPa)	61.10	62.10	45.80	44.30

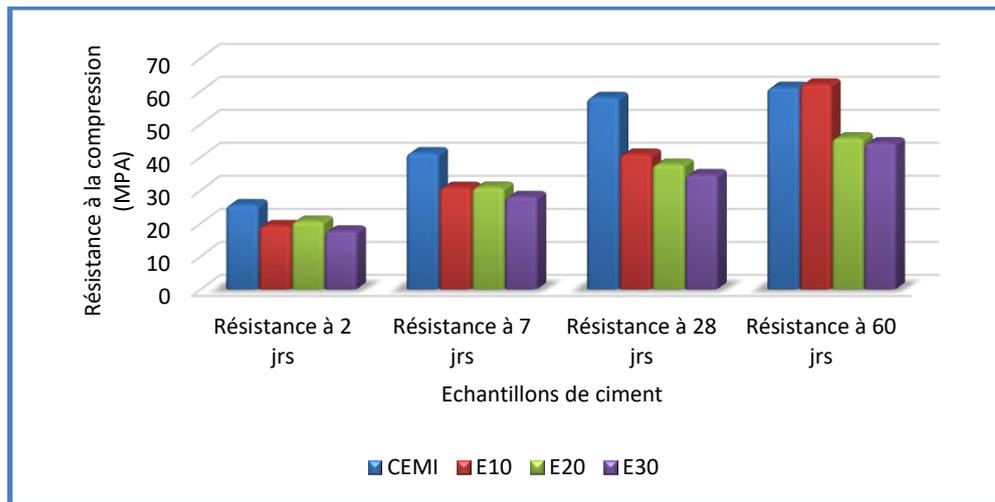


Figure III. 13: Résistance à la compression des mortiers de ciments à base de cendre des grignons d'olive

Concernant la résistance à la compression, on a remarqué une variation proportionnelle de la résistance en fonction du temps. Les ciments contenant la cendre ont enregistré entre 28 et 60 jours des augmentations de résistance plus importante que le ciment de référence. L'échantillon de 10% de cendre a enregistré une augmentation de plus de 20MPa entre 28 et 60 jours. L'explication de cette augmentation nécessite des études microscopiques minéralogiques.

Ces résultats sont en accordances avec ceux de l'absorption capillaire mesurés aux mêmes âges de conservation.

Tableau III. 20: Résistance à la compression des mortiers de ciments à base de la poudre de Gel de Silice

Echantillons	CEM I	E2.5	E5	E7.5
Résistance à 2jrs (MPa)	25.57	20.30	24.31	19.60
Résistance à 7jrs (MPa)	41.28	37.25	41.6	34.10
Résistance à 28 jrs (MPa)	58.05	57.52	52.60	51.67
Résistance à 60 jrs (MPa)	61.10	63.10	57.55	57.15

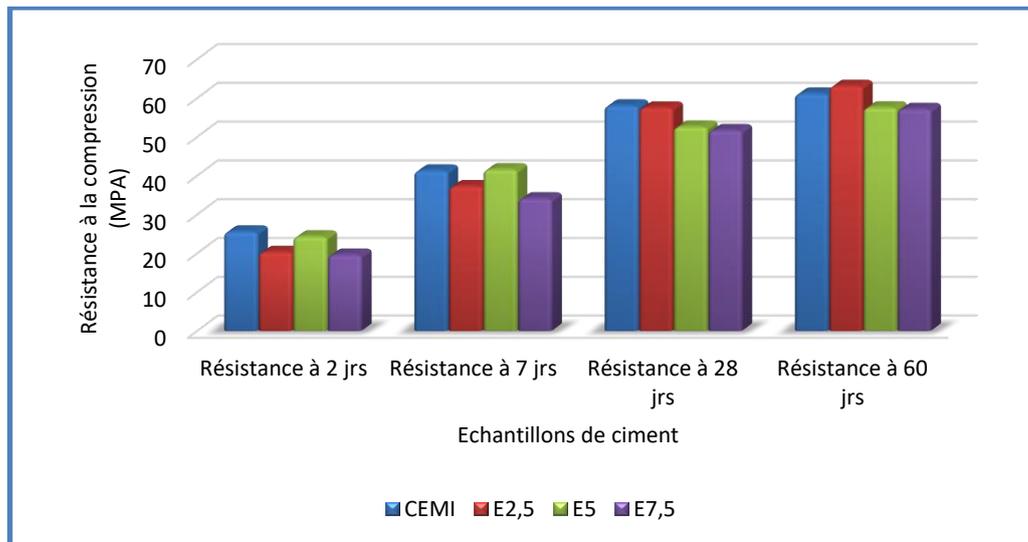


Figure III. 14: Résistance à la compression des mortiers de ciments à base de la poudre de Gel de Silice

Comme prévu, la présence de la poudre du gel de silice a contribué à l'augmentation des résistances à moyen terme. Cette augmentation devient plus en plus importante au cours du temps. Ce comportement est dû à la poursuite de la réaction pozzolanique.

III.1.1.4.2 Résistance mécanique à la flexion

L'essai de rupture par flexion consiste à appliquer une charge concentrée au milieu de la portée. Les résultats des essais de ruptures à la flexion sont reportés dans les Tableaux III.17.

Tableau III. 21: Résistance à la flexion des mortiers de ciments à base de cendre

Echantillons	CEM I	E10	E20	E30
Résistance à 2jrs (MPa)	4.74	3.73	3.61	3.08
Résistance à 7jrs (MPa)	7.07	4.62	4.97	6.13
Résistance à 28 jrs (MPa)	8.54	6.48	5.72	6.16
Résistance à 60 jrs (MPa)	8.23	7.17	6.05	5.77

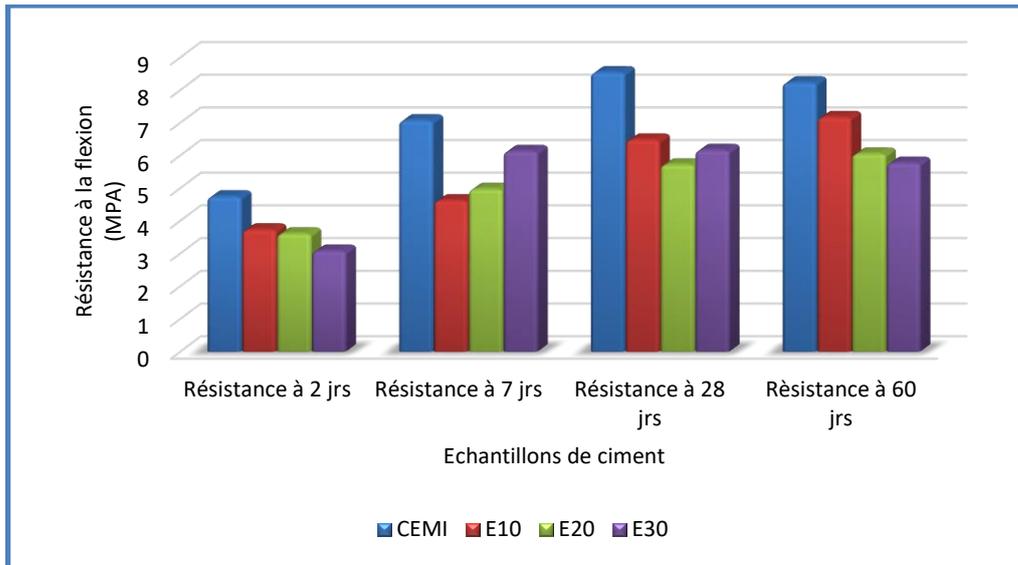


Figure III. 15: Résistance à la flexion des mortiers de ciments à base de cendre des grignons d'olive

L'étude des résultats de la résistance à la flexion des ciments préparés avec la cendre donne les mêmes remarques observées pour la résistance à la compression. La résistance du ciment CEMI reste toujours la plus importante.

Tableau III. 22: Résistance à la flexion des mortiers de ciments à base de poudre de Gel de Silice

Echantillons	CEMI	E2.5	E5	E7.5
Résistance à 2jrs (MPa)	4.74	6.38	5.73	5.19
Résistance à 7jrs (MPa)	7.07	6.79	7.02	6.07
Résistance à 28 jrs (MPa)	8.54	8.76	8.28	7.91
Résistance à 60 jrs (MPa)	8.23	8.21	8.10	8.60

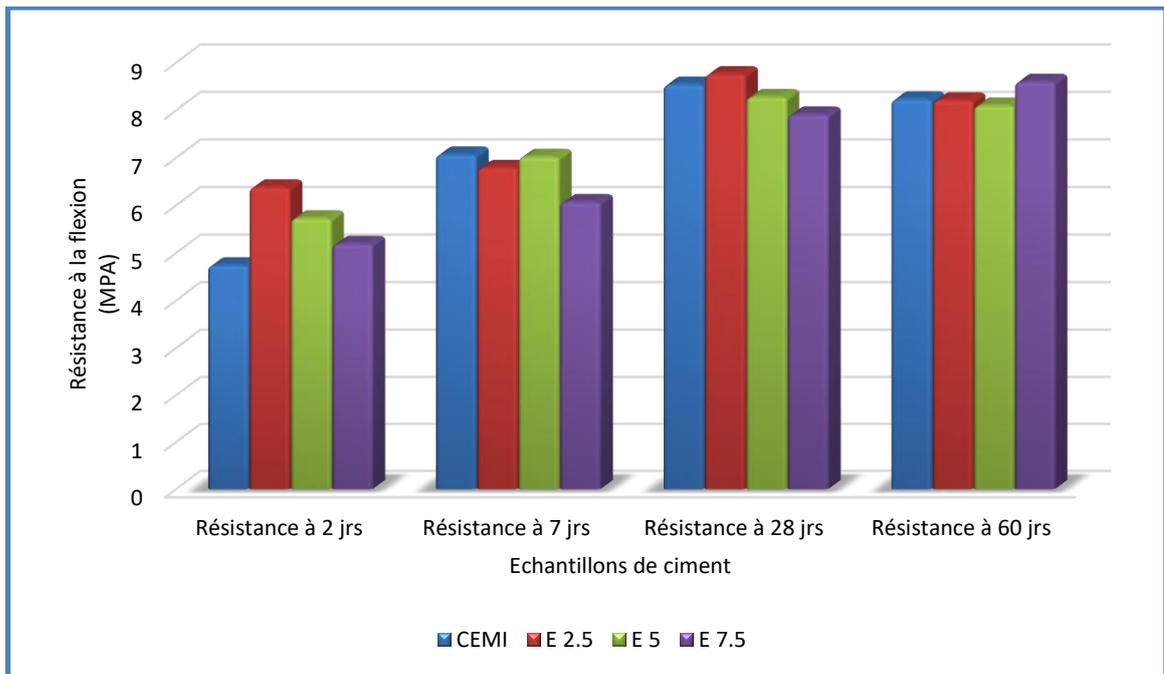
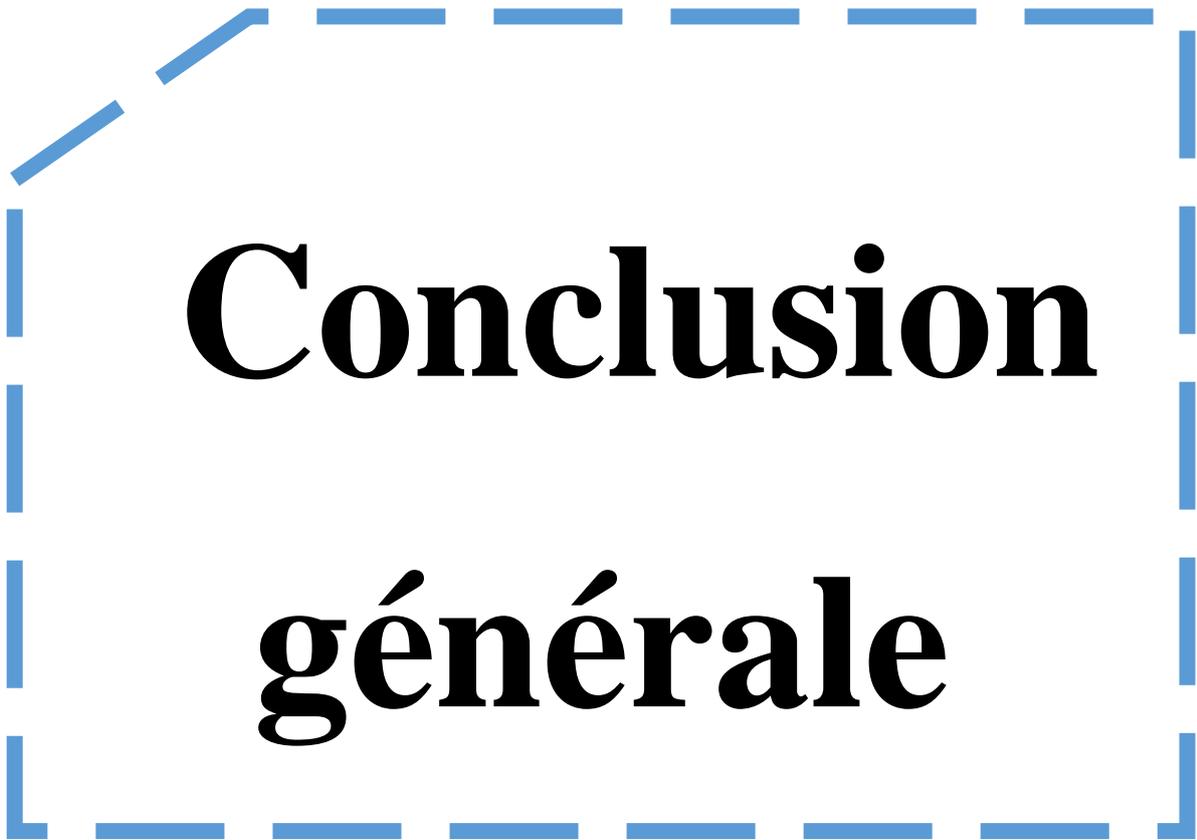


Figure III. 16: Résistance à la flexion des mortiers de ciments à base de la poudre de Gel de Silice

En général, les produits riches en silice amorphe donnent des bonnes résistances à la flexion. Leurs résistances dépassent même les résistances du CEMI à long terme. En conclusion la poudre de gel de silice est l'un de ces produits.

III.2 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons examiné en détail les différentes caractéristiques des ciments élaborés, mettant en lumière leur propriétés physico-chimiques, leur résistance et leur durabilité référencier selon les normes Algériennes cette étude approfondie permet de mieux comprendre le comportement de ces ciments tandis qu'une étude microscopique demeure pertinente pour bien interpréter les résultats trouvés.



Conclusion

générale

CONCLUSION GENERALE

Ces derniers temps, l'industrie du génie civil s'oriente de plus en plus vers des pratiques durables et respectueuses de l'environnement. De nouvelles tendances ont émergé, telles que le recyclage des déchets et la construction durable qui reflètent cette préoccupation grandissante. Notre travail s'inscrit dans cette même perspective.

Au terme du travail expérimental réalisé dans le cadre du projet de fin d'études, les points suivants peuvent se dégager :

- Les ciments composés présentent des masses volumiques (absolu, apparente) inférieures à celles enregistrées par l'échantillon de référence.

- Les masses volumiques apparentes des mortiers élaborés avec les nouveaux ciments à l'état frais et à l'état durci sont inférieures au mortier de ciment portland, ce qui peut être considéré un avantage pour les structures lourdes.

- La plupart des échantillons ont enregistré des temps de début de prise très proches. Tandis que le temps de fin de prise varie d'un échantillon à un autre. Il semble que la contribution de la cendre des grignons d'olive est plus importante que la poudre de Gel de Silice dans l'accélération du temps de prise.

- La cendre des grignons d'olive absorbe une quantité plus importante d'eau de gâchage que la poudre de Gel de Silice.

- Le ciment qui contient 2.5% de Gel de Silice ainsi que le ciment de 20% de cendre semblent favorables pour réduire la porosité et pour améliorer les performances du ciment.

- Les ciments élaborés à base de Gel de Silice présentent une perte en masse dans le milieu agressif moins que les ciments élaborés à base de la cendre. Donc le Gel de Silice améliore la durabilité des ciments.

- L'échantillon de 10% de cendre a enregistré une augmentation de 20MPa dans la résistance à la compression entre 28 et 60 jours.

- La présence de la poudre du gel de silice a contribué à l'augmentation des résistances à moyen terme.

Réglementairement, toutes les exigences de **la Norme Algérienne NA 442 (2013)** qui traite les ciments ont été vérifiées pour le ciment qui contient de Gel de Silice 2.5% et pour le ciment qui contient 10% de cendre du grignon.

D'après les résultats obtenus, on peut conclure que la cendre du grignon et la poudre de Gel de silice permet d'améliorer les propriétés physiques et la durabilité, ainsi les propriétés mécaniques des produits cimentaires.

Compte tenu de cette étude, On a proposé de faire mélanger ces deux ajouts dans une seule formulation cimentaire (10% de cendre et 2.5% de Gel de Silice), pour laquelle nous avons réalisé des essais mécaniques, physiques et des analyses chimiques. Le but de ce travail est de dégager une ébauche de fiche technique conformément à la norme algérienne.



Fiche

technique

CEM II/A – (C-S) 42.5R

FICHE TECHNIQUE

CEM II-(C-S) 2.5R

CIMENT PORTLAND AU AJOUT TYPE II

Ciment composé de :

- 82.5% de clinker
- 12.5% d'ajout : 10% de cendre, 2.5% de Gel de Silice
- 5% gypse

A une résistance rapide à court terme, destiné aux domaines où les délais de décoffrage sont courts.



CEM II/A 42.5 R

Conforme à la norme Algérienne (NA442-2013)

Principaux domaines d'emploi

Destiné à la réalisation des constructions dans le génie civil, ainsi pour le domaine de préfabrication.

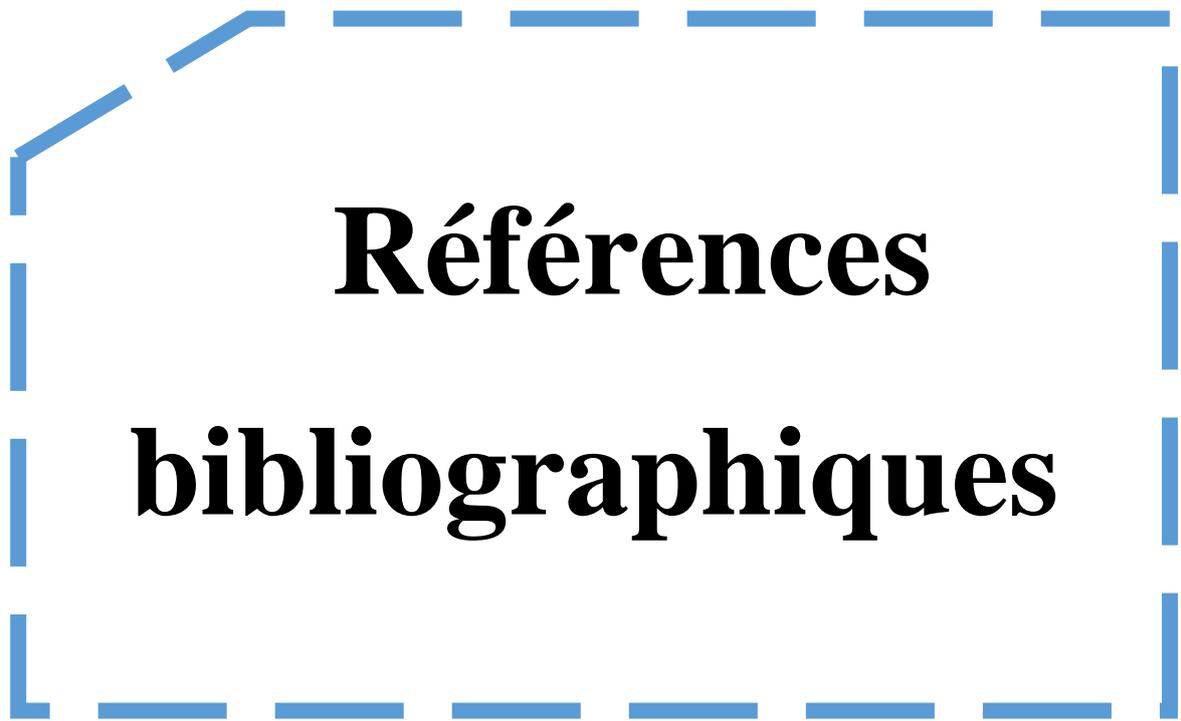
Caractéristiques techniques

Analyse chimique	Valeur
PAF	2.60
Teneur en sulfate	2.92
Teneur en oxyde de MgO	2.19
Teneur chlorures	0.008

Propriétés physiques	Valeur
Consistance normale	31.8
Début de prise (min)	187.94
Fin de prise (min)	297

Caractéristiques mécaniques

Résistance à	2 jours	28 jours
La compression (MPa)	22.5	45.60
La flexion (MPa)	4.40	8.02



Références
bibliographiques

Références bibliographiques

- [1]. "Ciment S" ,by Joseph ABDO, Technique de l'ingénieur
- [2]. Dr. Tahar ALI-BOUCETTA, Chapitre II Le Ciment
- [3]. Nigri G. Etude de l'influence des ajouts minéraux sur la qualité et les propriétés du ciment, Mémoire de Magister, Université 8 Mai 1945, Guelma, Algérie, 2005.
- [4]. <https://www.materiauxcimentaires.com/cour.php?action>
- [5].<https://www.ciment.wikibis.com/clinker.php?fbclid=IwAR3JLL2INKhH4xtxECDhIZ4tHYJpoZDyGJsyLq9kvnXYjPZ0eZhFKLAy0>
- [6]. BOUHAMID Mama (Elaboration d'un Eco-ciment Pouzzolanique A base de vase DE barrage Hydraulique Traitee Et Dechet De brique De Construction), Mémoire Magister, Université de oran 2010 /2011, P41
- [7]. <https://123dok.net/article/les-ajouts-cimentaires-les-ajouts-cimentaires.zgw9mn56>
- [8].https://www.actuenvironnement.com/ae/dictionnaire_environnement/definition/laitiers_de_hauts-fourneaux.php4
- [9].<https://123dok.net/article/les-cendres-volantes-les-diff%C3%A9rents-types-d-ajouts.z3dvpq7y>
- [10]. Momene S. AthamniaG.Ciment et cimenteries en Algérie. Production et normalisation. Mémoire de master. Génie civile. Conception et calcul de construction. Université 8 mai 1945. Guelma. 2013.
- [11]. <https://www.infociments.fr/norme-beton-nf-en-197-1-constituants-des-ciments>
- [12]. Nigri G. Nouvelle élaboration d'un liant hydraulique, Thèse de doctorat, Université 8 Mai 1945, Guelma, Algérie 2018.
- [13]. <http://bibdspace.univ-tiaret.dz/bitstream/123456789/11663/2/chapitre%2002.pdf>
- [14]. DUXSON P., Fernandez Jiménez A., J.L. Provis, G.C. Lukey, A. Palomo, J.S.J. Van Deventer, Geopolymer technology: the current state of the art, J. Mater. Sci. 42(2007)2933-2917.
- [15]. Davidovitch J. s, Geopolymer Chemistry and Applications, third ed., Institute of Geopolymer, France, 2011
- [16]. CHAID R., JAUBERTHIE R. et BOUKHALED A., « Effet de l'ajout calcaire sur la durabilité des bétons ». Lebanese Science Journal, Vol. 11, No. 1, 2010
- [17]. <https://www.toutsurlebeton.fr/le-ba-ba-du-beton/le-ciment-composition-et->

- [18]. <https://www.toutsurlebeton.fr/le-ba-ba-du-beton/le-ciment-composition-et-fabrication/#:~:text=Voici%20les%20diff%C3%A9rents%20types%20de%20ciment>
- [19]. Meziani S, Yousfi N, l'évaluation d'impact de l'industrie du ciment sur l'environnement a l'aide de l'analyse de cycle de vie (acv) : cas de la cimenterie de hdjar-soud (schs) a skikda, Mémoire de master, Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou, 2017.
- [20]. Norme Algérienne. NA 442. Liants hydraulique, ciments courants : composition spécification et critères de conformité 2ème édition. IANOR. Alger. 200.
- [21]. http://www.la.refer.org/materiaux/chapitre_deux.html
- [22]. <https://www.toutsurlebeton.fr/le-ba-ba-du-beton/le-ciment-composition-et-fabrication/#:~:text=Voici%20les%20diff%C3%A9rents%20types%20de%20ciment>
- [23]. <http://www.schb.dz/processus-de-fabrication-du-ciment/>
- [24]. <https://www.toutsurlebeton.fr/le-ba-ba-du-beton/le-ciment-composition-et-fabrication>
- [25]. <http://www.schb.dz/processus-de-fabrication-du-ciment/>
- [26]. <https://www.toutsurlebeton.fr/le-ba-ba-du-beton/le-ciment-composition-et-fabrication/#:~:text=Voici%20les%20diff%C3%A9rents%20types%20de%20ciments%20courants%20utilisables,ciment%20compos%C3%A9%20%3A%20CEM%20V%2FA%20ou%20B%20>
- [27]. <https://www.infociments.fr/ciments/caracteristiques-et-emplois-des-ciments>
- [28]. <https://123bricolage.fr/comment-est-fabrique-le-ciment-etapes-processus-et-impact/>
- [29]. <https://lesjoyeuxrecycleurs.com/lexique/dechet/#:~:text=par%20AlexandreR%20%7C%20Nov%2017%2C%202023%20%7C%20Lexique>
- [30]. Journal officiel de la république algérienne n°27 :4 rabie el aoul 1426 13 avril 2005.
- [31]. Les déchets inertes Les installations de stockage de déchets inertes ISDI 1 er et 2 DDTM 64SDREM – 1er et 2 décembre 2014 L. consulté 20 mars 2024.
- [32]. FNADE : Muriel Morcet (mmocet @ cgea.Fr). Éco- profil du stockage des déchets dangereux en sites collectifs en France].
- [33]. B.SAVARY, R.VINCENT, C.RODRIGUES, A.CHOLLOT. Caractérisation des risques chimiques professionnels de la filière de gestion des déchets : Analyse a priori des risques potentiels.
- [34]. KHOUAN.F, LEBDIRI.Z. Caractérisation et utilisation de poussières de four de ciment CKD dans la stabilisation /solidification des déchets de l'unité B.C.R bordj-ménaïel boumer dés .thème, Université Abderrahmane Mira de Bejaia.2016.

- [35]. AHMED ADDOU, professeur d'université de Mostaganem. « Développement durable, traitement de déchets, valorisation, élimination », édition Ellipses, Algérie, 25 juillet 2009.
- [36]. BENYOUB.A, BERKOUKI. A, Impact de la Stabilisation/Solidification sur la cinétique de relargage des métaux lourds dans les matériaux poreux. Mémoire de fin d'étude (master II) ; Génie des procédés. Université Abderrahmane Mira – Bejaia : 2013.
- [37]. MARTIN, S., GRISWOLD, W., Human Health Effects of Heavy Metals. Environ. Scien.And Technol. Bri. For Citizen. 2009, p15, 1-6.
- [38]. SOUSSOU, S. Adaptation de la symbiose Fabacées-rhizobium aux sites miniers : Absorption du zinc par Anthyllis vulneraria et analyse de la diversité des bactéries symbiotiques d'Hedysarum coronarium, Thèse de Doctorat ; Sousse, Tunis. 2013, 190p.
- [39]. E.P.A, Advancing Sustainable Materials Management, Facts and Figures Environmental Protection Agency, United States, 2017.
- [40]. R.Loussert, G.Brousse, L'olivier, Techniques agricoles et production Méditerranéennes, 1-6 p,1978.
- [41]. Les grignons d'olive, www.fao.org
- [42]. Amic. A, Dalmasso. C, « Unité de valorisation complète de déchets oléicoles par lombricompostage : Production de produits à haute valeur ajoutée : lombricompost, savon, collagène et lombrics », Thèse du doctorat, Université Aix-Marseille (AMU), Faculté des sciences et techniques Saint-Jérôme, 2013.
- [43]. <https://www.fellah-trade.com/fr/filiere-developpement-durable/fichestechniques/sous-produits-olivier>
- [44]. S. Atmane, R. Bareche, "Elaboration et caractérisation d'un matériau composite à base de PVC et de grignon d'olive local", Université de Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou, 2017.
- [45]. <https://www.pressesante.com/si-vous-jetez-les-sachets-de-gel-en-silice-vous-ne-le-ferez-plus-jamais/>
- [46]. <https://gel-de-silice.com/le-gel-de-silice-ou-silicagel-cest-quoi/>
- [47]. <https://sercalia.com/fr/gel-de-silice/>
- [48]. <https://conseilsbeutesante.com/comment-recycler-le-gel-de-silice-ou-le-gel-de-silice-quelques-idees-pratiques/>
- [49]. <https://hsamaterial.com/fr/Blog/fum%C3%A9-de-silice-granulaire.html>
- [50]. http://www.microsilicafume.eu/page/composition_silica_fume_amorphous_silicon_dioxide/f1.html
- [51]. file:///C:/Users/j/Desktop/memoire/grignon-dx27olive-1_compress.pdf

- [52]. Les grignons d'olive, www.fao.org.
- [53]. A.Nefzaoui, Valorisation des sous-produits de l'olivier, laboratoire de nutrition animale, inrade tunisie 2080 Ariana, tunisie, 1991.
- [54]. Nabil M. Al-Akhras and Mohamed Y Abdulwahid : Utilisation of olive waste ash in mortar mixtures. Article in Structuralconcrete. December 2010
- [55]. NF EN 196-1 Méthodes d'essais des ciments - Partie 1: détermination des résistances Paris, Septembre 2016.
- [56]. Norme NA235 : Liants hydrauliques - Détermination de la perte au feu. Institut Algérien de la normalisation.
- [57]. Norme NA5044 : Liants hydrauliques - Méthode pratique instrumentale d'analyse des ciments par spectrométrie de fluorescence des rayons X. Institut Algérien de la normalisation.
- [58]. Norme NA2187 : Liants hydrauliques - Détermination de la chaux libre. Institut Algérien de la normalisation.
- [59]. Norme NA2595 : Granulats - Détermination de la masse volumique absolue des fines Institut Algérien de la normalisation.
- [60]. Norme 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 inter granulaire.
- [61]. Norme EN 196-6 SSB : Méthodes d'essai des ciments - Détermination de la finesse. Décembre 2018.
- [62]. Norme NA229 : Ciments – Détermination de la consistance normale. Algérien de la normalisation.
- [63]. Norme NA230 : Ciments – Détermination du temps de prise. Institut Algérien de la normalisation.
- [64]. Norme NF EN 1015-6 : "Méthodes d'essai des mortiers pour maçonnerie-Partie6 : détermination de la masse volumique apparente du mortier frais". Octobre, 1999.
- [65]. La norme NF EN 1015-10.
- [66]. Norme EN 1015-3 - Méthodes d'essai des mortiers pour maçonnerie - Partie 3 : détermination de la consistance du mortier frais (avec une table à secousses), Octobre 2008.
- [67]. Norme NBN B15-215 (2018) : Essais des bétons : absorption d'eau par immersion, 2018.

[68]. Norme NF EN 18-459 (2010) : Norme Françaises.béton-essai pour béton durci-essai de porosité et de masse volumique, 2010.

[69]. Norme EN 13057 (2002) : Européenne norm : products and systems for the protection and repair of concrete strictures. Test Méthods, détermination of résistance of de l'absorption capillary, 2002.

[70]. Thèse de doctorat : Boukour. S. Caractéristiques physico-chimiques et durabilité des éco-composite cimentaires à base de granulats de caoutchouc issue de pneus usagés. Université 8 Mai 1945. Guelma. Algérie. 2017.

[71]. Norme Algérienne NA442. Liants hydrauliques-ciments courants : Composition spécifications et critères de conformité, 2 ème Edition, Edition Ianor, Algérie, 2000.

[72]. Norme NA229 : Ciments – Détermination de la consistance normale. Algérien de la normalisation.

[73]. Norme NF EN 1015-6 : "Méthodes d'essai des mortiers pour maçonnerie-Partie6.