

Université 20 Août 1955-Skikda
Faculté de Technologie
Département : Génie Civil
Ref : D012125007D



جامعة 20 أوت 1955 سكيكدة
كلية التكنولوجيا
قسم: الهندسة المدنية
المرجع: D012125007D

THESE

Présentée en vue de l'obtention du diplôme de

DOCTORAT LMD

En Génie civil

Option : **Matériaux en génie civil**

Par :

CHARIME Razika

Contribution à l'étude d'un béton de sable à base de cendres

Caractérisations - Formulations - Performances - Durabilité

Soutenue publiquement le 08/02/2025

Devant le jury composé de :

| | | | |
|-----------------------|------------|------------------------------|---------------|
| Dr. BOUGHAMSA Wassila | M.C.A | Univ. 20 Aout 1955 - Skikda | Présidente |
| Dr. ABDELOUAHED Assia | M.C.A | Univ. 20 Aout 1955 - Skikda | Rapporteur |
| Pr. HEBHOUB Houria | Professeur | Univ. 20 Aout 1955 - Skikda | Co-Rapporteur |
| Dr. KHERRAF Leila | M.C.A | Univ. 20 Aout 1955 - Skikda | Examineur |
| Pr. CHERAIT Yacine | Professeur | Univ. 08 Mai 1945 - Guelma | Examineur |
| Pr. NAFA Zahreddine | Professeur | Univ. 08 Mai 1945 - Guelma | Examineur |
| Pr. ACHOURA Djamel | Professeur | Univ. Badji Mokhtar - Annaba | Examineur |
| Pr. BELACHIA Mouloud | Professeur | Univ. 08 Mai 1945 - Guelma | Invité |

Remerciements

Au terme de ce travail, je tiens à exprimer ma profonde et sincère gratitude envers Madame ABDELOUAHED Assia, Maître de conférences à l'université de Skikda et Directrice de thèse, ainsi qu'envers Madame HEBHOUB Houria, Professeur à l'université de Skikda et co-Directrice de thèse, pour leur encadrement scientifique, leur patience, et surtout pour leurs conseils et leurs orientations tout au long du développement de mon sujet de recherche. Je souhaite qu'elles trouvent ici l'expression de mon profond respect.

Je souhaite exprimer ma reconnaissance aux membres de jury, tout en leur adressant mes plus vifs remerciements. A Madame BOUGHAMSA Wassila, Maître de conférences à l'université de Skikda pour m'avoir fait l'honneur de présider le jury de la soutenance. Mes chaleureux remerciements vont également à Madame KHERRAF Leila, Maître de conférences à l'université de Skikda, ainsi qu'à Monsieur CHERAIT Yacine, Professeur à l'université de Guelma, à Monsieur NAFA Zahreddine, Professeur à l'université de Guelma, et Monsieur ACHOURA Djamel, Professeur à l'université d'Annaba pour avoir accepté d'être examinateurs et pour leur contribution au jury. Un grand merci également à Monsieur BELACHIA Mouloud, Professeur à l'université de Guelma, pour son intérêt porté à ce travail et sa participation en tant qu'invité lors de cette thèse.

A l'ensemble du personnel du Laboratoire des Matériaux de Génie Civil de l'Université de Skikda.

Je souhaite exprimer ma profonde reconnaissance envers le personnel du Laboratoire National de l'Habitat et de la Construction (LHC-Est) de Skikda pour leur accueil généreux et leur soutien tout au long de cette thèse, en particulier envers Bilel, Mohamed, Moussa et Reda.

Je souhaite également transmettre mes remerciements au personnel du Laboratoire de chimie de la cimenterie Hadjar Soud (Groupe GICA) /Skikda pour leur accueil, en particulier à Mme ZAABAT Hanane. Ses conseils et nos échanges enrichissants ont grandement contribué à l'avancement de ce travail.

Un grand merci également à Mr RAMDANE Azziz et Mme GUELLIL Khadidja du Laboratoire du Centre de Recherche et de Développement (CRD) de Boumerdes de l'entreprise pétrochimique Sonatrach/Algérie pour leur précieuse assistance lors des essais sur la microstructure.

Je tiens à exprimer mes sincères remerciements à toutes les personnes qui m'ont apporté leur aide et leurs encouragements, que ce soit de près ou de loin. Je voudrais particulièrement exprimer ma gratitude envers Monsieur SAFI Walid de l'entreprise ESCADRON Skikda, ainsi qu'à Madame OMEIRI Zahra de l'entreprise des Travaux Publics (DTP) de Skikda pour la fourniture des matériaux de construction. Mes remerciements vont également à Monsieur Baiche Malek, Monsieur DANDANI, Monsieur LAIFA(TOPPING), Monsieur SATOUH Kamel, ainsi qu'à Madame RAHIM Soumia de l'entreprise Sonatrach. Qu'ils trouvent ici l'expression de ma profonde gratitude.

Je suis enfin très reconnaissante envers ma famille, en particulier ma mère, et envers ma petite sœur Rym, ma sœur Meriem Fakhreddine et mon frère Karim pour leur inestimable soutien et aide qu'ils m'ont apporté durant toutes ces années.

Ma reconnaissance au Tout-Puissant miséricordieux qui a éclairé mon chemin et m'a accordé la volonté et la persévérance, surtout lors des moments les plus difficiles, pour la réussite de ce travail.

A ma famille,

Ma mère et à ma sœur Rym.

Mon frère Karim et à ma sœur Meriem Fakhreddine.

Mon Défunt père et ma défunte sœur Nagoua

Mes neveux et nièces Nina, Mehdi et Sara, Daoud, Salaheddine,

Sid Ali, Ines et Lina.

*qui n'ont de cesse de m'encourager, de me soutenir, et de me porter
dans leur cœur,*

Et à tous mes amis.

Résumé

Cette étude porte sur le développement d'un béton de sable durable incorporant des cendres de canne (CA) comme ajout cimentaire au ciment portland (CEMI) à des proportions de 0, 8, 16, et 24 %. CA est issu d'un déchet agricole composé de parties de tiges et de feuilles de canne, collecté localement des champs de Skikda/Algérie après leur combustion, qui était antérieurement jeté ou brûlé, en réponse aux préoccupations environnementales. Les propriétés des mélanges préparés ont été testées et comparés à un béton témoin (CC0). Une évaluation de l'effet de CA sur les propriétés à l'état frais et durci a été effectuée et leurs paramètres ont été corrélés, notamment: les résistances à la compression et à la traction par flexion, la densité, le module d'élasticité (MOE), la résistance aux ultrasons (UPV), la résistance au scléromètre (RHN) et l'essai combiné.

Les caractéristiques de durabilité ont été évaluées pour l'absorption par immersion, l'absorption capillaire, la sorptivité et la pénétration des chlorures. De plus, les bétons ont été soumis à des attaques chimiques par des acides chlorhydrique, sulfurique, nitrique, acétique, de l'hydroxyde de sodium, et des sulfates de magnésium de même concentration (5%) dans des conditions d'immersion totale pendant 120 jours d'exposition. Une analyse de la microstructure a été réalisée par diffraction des rayons X (DRX) et par microscopie électronique à balayage (MEB), complétée par une analyse par rayons X à dispersion d'énergie (EDAX).

Les résultats révèlent que l'ajout 8-16% CA augmente l'ouvrabilité, ce qui s'avère avantageux pour la mise en œuvre des bétons de sable dans divers types de coffrages. De plus, la proportion 8-24% CA accroît l'absorption d'eau et l'absorption capillaire, avec des effets acceptables à long terme. Le taux 8% CA améliore la résistance mécanique, l'homogénéité, la résistance à la pénétration des chlorures, la résistance chimique à l'acide chlorhydrique, et la microstructure du béton de sable. Un taux de 24% CA a un impact positif sur la résistance à l'agression de l'acide sulfurique, tandis qu'un dosage de 8-24% CA renforce la résistance des bétons de sable exposés à l'hydroxyde de sodium et les sulfates de magnésium, ce qui est particulièrement avantageux pour la construction dans les régions côtières. Aussi, les bétons contenant 0-24% CA peuvent être utilisés pour des applications structurelles. Les formules de corrélation établies entre les divers paramètres, seront un outil pratique pour la prévision ou l'estimation lorsque l'une de leurs valeurs est disponible. Ainsi, les cendres CA, peuvent être utilisées comme ajout cimentaire dans de nombreuses applications; et l'effet positif du taux de 8% peut être employé pour produire un béton de sable rentable et durable.

Mots clés: Béton de sable, Cendres de canne, Valorisation, Propriétés physiques et mécaniques, Durabilité, Résistance aux acides et bases, Attaque par les sulfates et les chlorures, Microstructure.

Abstract

This study focuses on developing sustainable sand concrete (SC) using cane ash (CA) as a cement replacement material. CA is an agricultural waste consisting of parts of cane plant stems and leaves, collected from local fields in Skikda/Algeria, which was previously discarded or burned as an alternative to environmental concerns. Four different proportions of CA (0%, 8%, 16%, and 24%) were blended with ordinary Portland cement (OPC) to produce the SC mixtures. The properties of these mixtures were then compared to a control mixture. The performance of the SC mixtures was evaluated in both fresh and hardened states in terms of their compressive and flexural strength, hardened density, elastic modulus (MOE), ultrasonic pulse velocity (UPV), rebound hammer (RHN), and the combined test.

The durability characteristics were assessed for absorption by immersion, capillary absorption, sorptivity, and chloride penetration. Additionally, the mixtures were subjected to chemical attacks by hydrochloric, sulphuric, nitric, acetic acids, sodium hydroxide, and magnesium sulfate solutions of the same concentration (5%) under full immersion conditions for up to 120 days of exposure. The microstructure of SC was analyzed using X-ray diffraction (XRD) and scanning electron microscopy (SEM) with energy-dispersive X-ray analysis (EDAX).

The results reveal that the addition of 8-16% CA increases workability, which is advantageous for the implementation of sand concretes in various types of formworks. Furthermore, the proportion of 8-24% CA enhances water absorption and capillary absorption, with acceptable long-term effects. A rate of 8% CA improves mechanical strength, homogeneity, resistance to chloride penetration, chemical resistance to hydrochloric acid, and the microstructure of sand concrete. A rate of 24% CA has a positive impact on resistance to sulfuric acid aggression, while a dosage of 8-24% CA strengthens the resistance of sand concretes exposed to sodium hydroxide and magnesium sulfates, which is particularly beneficial for construction in coastal areas. Additionally, concretes containing 0-24% CA can be used for structural applications. The correlation formulas established between various parameters will be a practical tool for forecasting or estimating when one of their values is available. Thus, CA ashes can be used as a cementitious addition in many applications; and the positive effect of the 8% rate can be employed to produce cost-effective and durable sand concrete.

Keywords: Sand concrete, Cane ash, Valorization, Physical and mechanical properties, Durability, Acid and base resistance, Sulfate and chloride attack, Microstructure.

ملخص

هذه الدراسة تركز على تطوير خرسانة رملية مستدامة تتضمن رماد القصب كمادة إضافية للإسمنت البورتلاندي العادي بنسب 0% و 8% و 16% و 24%. يأتي رماد القصب من نفايات نباتية تتألف من أجزاء من سيقان وأوراق القصب، تم جمعها محليا من حقول سكيكدة / الجزائر بعد حرقها، والتي كانت تُلقى سابقا أو تُحرق، استجابةً للمخاوف البيئية. تم اختبار خصائص الخلطات المحضرة ومقارنتها بخرسانة مرجعية. تم إجراء تقييم لتأثير رماد القصب على الخصائص الفيزيائية والميكانيكية وتم ربط خصائصها، بما في ذلك: قوى الضغط والشد المرن، الكثافة، معامل المرونة، مقاومة الأمواج فوق الصوتية، مقاومة الكلورومتر والاختبار المشترك.

تم تقييم خصائص ديمومة الخرسانة عبر تجربة امتصاص الغمر، الامتصاص الشعري، امتصاص واختراق الكلوريد. بالإضافة إلى ذلك، تعرضت الخرسانة لهجمات كيميائية من حمض الهيدروكلوريك والكبريتيك والنيتريك وحمض الخل وهيدروكسيد الصوديوم وكبريتات المغنيسيوم بنفس التركيز (5%) في ظروف الغمر الكلي ولمدة 120 يومًا. تم تحليل البنية المجهرية باستخدام تفريق الأشعة السينية والمجهر الإلكتروني الماسح مكتملة بتحليل بالأشعة السينية بتفريق الطاقة.

تظهر النتائج أن إضافة 8-16% من رماد القصب تزيد من قابلية التشغيل، مما يعد ميزة مفيدة لتطبيقات الخرسانة الرملية في أنواع مختلفة من القوالب. بالإضافة إلى ذلك، فإن نسبة 8-24% من رماد القصب تعزز من امتصاص الماء والامتصاص الشعري، مع تأثيرات مقبولة على المدى الطويل. كما أن نسبة 8% من رماد القصب تحسن من المقاومة الميكانيكية، والتجانس، ومقاومة اختراق الكلوريدات، والمقاومة الكيميائية لحمض الهيدروكلوريك، والبنية المجهرية للخرسانة الرملية. بينما تؤثر نسبة 24% من رماد القصب بشكل إيجابي على مقاومة الهجوم من حمض الكبريتيك. علاوة على ذلك، فإن نسبة 8-24% من رماد القصب تعزز مقاومة الخرسانات الرملية المعرضة لهيدروكسيد الصوديوم وكبريتات المغنيسيوم، مما يعد مفيدًا بشكل خاص للبناء في المناطق الساحلية. أيضًا، يمكن استخدام الخرسانات التي تحتوي على 0-24% من رماد القصب للتطبيقات الهيكلية. ستشكل الصيغ المرتبطة التي تم إنشاؤها بين الخصائص المختلفة أداة عملية للتنبؤ أو التقدير عندما تكون إحدى قيمها متاحة. وبالتالي، يمكن استخدام رماد القصب كإضافة أسمنتية في العديد من التطبيقات؛ ويمكن الاستفادة من التأثير الإيجابي لنسبة 8% لإنتاج خرسانة رملية اقتصادية ومستدامة.

الكلمات المفتاحية: الخرسانة الرملية، رماد القصب، التثمين، الخصائص الفيزيائية والميكانيكية، ديمومة، مقاومة الحمض والقاعدة، هجوم الكبريتات والكلوريدات، البنية المجهرية.

Sommaire

| | |
|------------------------------|----------|
| Remerciements | i |
| Dédicaces | ii |
| Résumé | iii |
| Abstract | iv |
| ملخص | v |
| Sommaire | vi |
| Liste des figures | vii |
| Liste des tableaux | viii |
| Introduction générale | 2 |

Chapitre I: Synthèse bibliographique

| | |
|--|----|
| I.1. Introduction | 6 |
| I.2. Valorisation des cendres de déchets agricoles dans le domaine de génie civil | 6 |
| I.2.1. Introduction | 6 |
| I.2.2. Valorisation des déchets agricoles dans le béton | 8 |
| I.2.3. Valorisation des déchets agricoles comme pouzzolane active pour le ciment | 10 |
| I.2.4. Valorisation des déchets agricoles comme filler dans le mélange de béton bitumineux | 11 |
| I.3. Effet des agro-ciments provenant de déchets agricoles sur les propriétés des bétons | 12 |
| I.3.1. Effet des agro-ciments sur la résistance mécanique | 12 |
| I.3.2. Effet des agro-ciments sur la perméabilité et les paramètres de durabilité | 13 |
| I.3.2.1. Attaque chimique | 13 |
| I.3.2.2. Absorption d'eau | 14 |
| I.3.3. Temps de prise (temps de début et fin de prise) | 15 |
| I.4. Propriétés des cendres de déchets agricoles incorporées au béton | 15 |
| I.5. Effet des agro-ciments sur la matrice cimentaire | 17 |
| I.6. Les cendres de déchets agricoles les plus utilisées comme agro-ciment | 18 |
| I.6.1. Cendres de balles de riz (RHA) | 18 |
| I.6.2. Cendres de palme à huile (POFA) | 19 |
| I.6.3. Cendres de déchets de bois WWA | 21 |
| I.6.4. Cendres de feuilles de bambou (BLA) | 21 |
| I.6.5. Cendres d'épi de maïs (CCA) | 22 |
| I.6.6. Cendres de palmier dattier (DPA) | 23 |
| I.6.7. Cendres de déchets d'olives (OWA) | 25 |
| I.6.8. Cendres de pailles de blé (WSA) | 25 |
| I.6.9. Cendres de bagasse de canne à sucre (SBCA) | 27 |
| I.7. Cendres de canne (CA) | 29 |
| I.7.1. Effet des déchets de canne utilisés comme agro-ciment sur l'environnement | 30 |
| I.7.2. Processus de valorisation des cendres de canne comme ajout cimentaire | 31 |
| I.7.3. Effets positifs de l'emploi des cendres de canne comme ajout cimentaire | 32 |
| I.7.3.1. Avantages techniques | 32 |
| I.7.3.2. Avantages économiques | 33 |
| I.7.3.3. Avantages écologiques et environnementaux | 33 |
| I.8. Travaux antérieurs | 33 |
| I.9. Conclusion | 36 |

Chapitre II: Caractérisation des matériaux utilisés

| | |
|--|----|
| II.1. Introduction | 38 |
| II.2. Caractérisation des matériaux | 38 |
| II.2.1. Ciment | 38 |
| II.2.2. Cendres de canne | 39 |
| II.2.3. Sable | 40 |
| II.2.4. Fines calcaires | 42 |
| II.2.5. Adjuvant | 43 |
| II.2.6. Eau de gâchage | 44 |
| II.2.7. Analyse des résultats de caractérisation du ciment et des cendres de canne | 44 |
| II.2.8. Caractéristiques morphologiques | 45 |
| II.3. Conclusion | 49 |

Chapitre III: Programme expérimental et méthodologie d'essai

| | |
|---|----|
| III.1. Introduction | 51 |
| III.2. Programme expérimental | 51 |
| III.3. Formulation des mélanges | 51 |
| III.3.1. Formulation d'un béton de sable témoin CC0 | 52 |
| III.3.2. Formulation du béton de sable à base de cendres de canne | 52 |
| III.4. Fabrication des mélanges et mise en place | 54 |
| III.4.1. Malaxage des bétons | 54 |
| III.4.2. Moules utilisés | 55 |
| III.4.3. Confection des éprouvettes | 56 |
| III.4.4. Conservation des éprouvettes | 56 |
| III.5. Méthodes d'essais | 59 |
| III.5.1. Essais à l'état frais | 59 |
| III.5.1.1. Affaissement au cône d'Abrams | 59 |
| III.5.1.2. Teneur en air occlus | 60 |
| III.5.1.3. Densité à l'état frais | 60 |
| III.5.2. Essais à l'état durci | 61 |
| III.5.2.1 Densité à l'état durci | 61 |
| III.5.2.2. Essai de rupture par compression uni-axiale | 62 |
| III.5.2.3. Essai de traction par flexion 3points | 62 |
| III.5.2.4. Essai au scléromètre | 63 |
| III.5.2.5. Essai aux ultrasons | 64 |
| III.5.2.6. La méthode combinée | 65 |
| III.5.2.7. Mesure du module d'élasticité (MOE) | 65 |
| III.5.3. Essais de caractérisation physique et de durabilité | 65 |
| III.5.3.1. Essai d'absorption d'eau par immersion | 65 |
| III.5.3.2. Essai d'absorption capillaire et sorptivité | 66 |
| III.5.3.3. Essai de pénétration des chlorures | 67 |
| III.5.3.4. Essai d'attaque chimique par les acides, les bases et les sulfates | 68 |
| III.5.4. Essais sur la microstructure des bétons de sable | 69 |
| III.5.4.1. Analyse par diffractométrie des rayons x (DRX) | 69 |
| III.5.4.2. Analyse par microscopie électronique à balayage (MEB/EDAX) | 70 |
| III.6. Conclusion | 71 |

Chapitre IV: Effet des cendres de canne sur les propriétés physiques et mécaniques du béton de sable

| | |
|--|----|
| IV.1. Introduction | 73 |
| IV.2. Effet des cendres de canne sur les propriétés physiques du béton de sable | 73 |
| IV.2. 1. Ouvrabilité | 73 |
| IV.2. 2. Teneur en air occlus | 74 |
| IV.2.3. Densité à l'état frais | 75 |
| IV.3. Effet des cendres de canne sur les propriétés mécaniques du béton de sable | 76 |
| IV.3.1. Résistance à la compression | 76 |
| IV.3.2. Résistance à la traction par flexion | 79 |
| IV.3.3. Densité | 81 |
| IV.3.4. Module d'élasticité (MOE) | 83 |
| IV.3.5. Résistance par scléromètre (RHN) | 86 |
| IV.3.6. Résistance par auscultation sonore (UPV) | 88 |
| IV.3.7. Méthode Combinée | 90 |
| IV.4. Effet des cendres de canne sur la microstructure du béton de sable | 92 |
| IV.4.1. Analyse de la microstructure par DRX | 92 |
| IV.4.2. Analyse de la microstructure par MEB-EDAX | 95 |
| IV.5. Conclusion | 99 |

Chapitre V: Effet des cendres de canne sur les paramètres de durabilité

| | |
|--|------------|
| V.1. Introduction | 102 |
| V.2. Effet des cendres de canne sur les paramètres de durabilité des bétons de sable | 102 |
| V.2.1. Absorption d'eau par immersion | 102 |
| V.2.2. Absorption capillaire et sorptivité | 104 |
| V.2.3. Pénétration des chlorures | 105 |
| V.2.4. Attaques chimiques | 110 |
| V.2.4.1. Effet de l'acide chlorhydrique HCL | 110 |
| V.2.4.2. Effet de l'acide sulfurique H ₂ SO ₄ | 114 |
| V.2.4.3. Effet de l'acide nitrique HNO ₃ | 119 |
| V.2.4.4. Effet de l'acide acétique CH ₃ COOH | 123 |
| V.2.4.5. Effet de l'hydroxyde de sodium NaOH | 128 |
| V.2.4.6. Effet des sulfates de magnésium MgSO ₄ | 130 |
| V.3. Conclusion | 136 |
| Conclusion générale et perspectives | 139 |
| Références bibliographie | 143 |

Liste des figures

| | |
|---|----|
| Figure I.1: Déchets agricoles et résidus agro-alimentaires produits (Blesson & Rao, 2023) | 7 |
| Figure I.2: Transformation des cendres non traitées de POFA en cendres ultrafines avec la modification de leur couleur à chaque phase du processus (Zeyad et al. 2017) | 9 |
| Figure I.3: (a) Epi de maïs brute ; (b) Epi de maïs moulu ; (c) Epi de maïs brûlé dans un four cyclonique ; (d) Cendres d'épi de maïs CCA calcinées dans un four à moufle ; et (e) Cendres CCA broyées dans un broyeur à boulets (Shakouri et al. 2020) | 9 |
| Figure I.4: (a) Four rotatif pour la calcination des pailles de blé à différentes températures variant de 550 à 750 °C ; (b) Broyeur à boulets pour le broyage des cendres de pailles de blé brûlées (Amin et al., 2019) | 10 |
| Figure I.5: Nombre de publications sur l'application des cendres de déchets agricoles dans le ciment (a) Au cours des années ; (b) De différents pays (Charitha et al., 2021) | 11 |
| Figure I.6: Influence des cendres de balle de riz (RHA) sur le développement de la résistance à la compression du béton (Le & Ludwig., 2016) | 11 |
| Figure I.7: Processus d'hydratation du ciment à base des cendres de balles de riz (RHA) (Raghav et al., 2021) | 18 |
| Figure I.8: (a) Balles de riz ; (b) Cendres des balles de riz (RHA) (Villar-Cociña et al., 2011) | 19 |
| Figure I.9: (a) Déchet de palmier à huile ; (b) Cendres de palmier à huile POFA (Sata et al., 2004) | 20 |
| Figure I.10 (a-b): Grappes de fruits de palmier à huile vides (Fapohunda and Oluwasegunota, 2019) | 20 |
| Figure I.11: (a) Cendres de bois en cours de tamisage ; (b) Cendres de bois après tamisage | 21 |
| Figure I.12: (a) Feuille de bambou ; (b) Cendres de feuilles de bambou (Villar-Cociña et al., 2011) | 22 |
| Figure I.13: (a) Epi et grains de maïs ; (b) Cendres de l'épi et des grains de maïs | 23 |
| Figure I.14 : Description des principales parties du palmier dattier (Agoudjil et al. 2011) | 24 |
| Figure I.15 : (a) Déchets de palmiers dattiers posés au sol au Tafilalet ; (b) Déchets des palmiers dattiers aux abords d'une ferme; (c) Incinération des résidus (Khaldi et al., 2024) | 25 |
| Figure I.16: Composition chimique des cendres du palmier dattier (DPA) à partir de publications sélectionnées (Thomas et al., 2021) | 25 |
| Figure I.17: (a) Cendres de balle de riz ; (b) Cendres de déchets d'olives (Hakeem et al., 2022) | 26 |
| Figure I.18: (a) Paille de blé avant combustion; (b) Cendres de paille de blé (WSA) à 550 C°; (c) WSA à 650 C°; (d) WSA à 750 C° (Amin et al., 2019) | 27 |
| Figure I.19: Processus de transformation de SCBA (Embong et al., 2016) | 28 |
| Figure I.20: Variation de l'apparence des cendres SCBA en fonction de la durée et des températures de calcination (Embong et al., 2016) | 29 |
| Figure I.21. Effet des cendres de bagasse de canne à sucre sur l'indice de conductivité des chlorures du béton (Bahurudeen et al., 2015) | 30 |
| Figure I.22: Images MEB des cendres de canne à sucre (SCBA) réalisées après 8 min (a) et 240 min ; (b) de broyage vibratoire (Cordeiro et al., 2008) | 30 |
| Figure I.23: (a) Canne de Skikda/Algérie ; (b) Cendres de canne de Skikda | 31 |
| Figure II.1: Ciment CEMI 42.5N d'Ain El Kebira-Sétif | 38 |
| Figure II.2: Transformation des déchets de canne originaires des champs de Skikda/Algérie en cendres de canne | 40 |
| Figure II.3: Sable de dunes d'Oued Zhor | 41 |

| | |
|--|----|
| Figure II.4: Mesure de la propreté du sable (ESV & ESP) | 41 |
| Figure II.5: Courbe granulométrique du sable de dunes d'Oued Zhor - Skikda | 42 |
| Figure II.6: Fillers calcaires de la carrière ENG de Ben Azzouz - Skikda | 43 |
| Figure II.7: Adjuvant superplastifiant Master Glenium 26 | 43 |
| Figure II.8: (a-d) Images MEB du ciment CEMI (Mag (a):x100; (b):x400; (c):x1000; (d):x2000) | 46 |
| Figure II.9: (a-f) Images MEB des cendres de canne (Mag (a):x100; (b):x425; (c):x504; (d):x2134; (e):x2150; (f):x3000) | 47 |
| Figure II.10: (a-d) Images MEB du sable de dunes (Mag (a):x300; (b):x512; (c):x1296; (d):x2136) | 48 |
| Figure II.11: (a-d) Images MEB des fillers calcaires (Mag (a):x100; (b):x400; (c):x1600; (d):x2000) | 48 |
| | |
| Figure III.1: Malaxage du béton de sable | 55 |
| Figure III.2: Moules normalisés utilisés | 55 |
| Figure III.3: Vibration de béton de sable sur la table à chocs | 56 |
| Figure III.4: Remplissage des éprouvettes | 56 |
| Figure III.5: Eprouvettes démoulées | 57 |
| Figure III.6: Conservation des éprouvettes dans l'eau | 58 |
| Figure III.7: Eprouvettes avant conservation dans les solutions d'attaque | 58 |
| Figure III.8: Préparation des solutions d'attaque chimique | 58 |
| Figure III.9: Conservation des éprouvettes 5x5x5 cm ³ dans les solutions d'attaque chimiques | 59 |
| Figure III.10: Essai d'affaissement au cône d'Abrams. | 59 |
| Figure III.11: Aéromètre à béton | 60 |
| Figure III.12: Densité du béton frais. | 61 |
| Figure III.13: Densité à l'état durci | 61 |
| Figure III.14: Essai de compression sur éprouvette 4x4x16 cm ³ | 62 |
| Figure III.15: Essai de traction par flexion trois points | 63 |
| Figure III.16: Essai au scléromètre | 64 |
| Figure III.17: Essai aux ultrasons en transmission directe | 65 |
| Figure III.18: Essai d'absorption d'eau par immersion | 66 |
| Figure III.19: Eprouvettes avec faces latérales enveloppées pour l'essai de l'absorption capillaire | 67 |
| Figure III.20: Essai de pénétration des chlorures | 68 |
| Figure III.21: Conservation des éprouvettes (50x50x50) mm ³ dans les solutions d'attaque chimiques | 69 |
| | |
| Figure IV.1 : Effet % CA sur l'ouvrabilité du béton de sable | 73 |
| Figure IV.2: Effet % CA sur la teneur en air occlus du béton de sable | 74 |
| Figure IV.3 : Effet % CA sur la densité à l'état frais du béton de sable | 75 |
| Figure IV.4: Effet % CA sur les propriétés du béton de sable à l'état frais | 76 |
| Figure IV.5: Effet de la durée de cure sur les résistances de compression des bétons de sable à base de CA | 76 |
| Figure IV.6 : Effet de la durée de cure sur la résistance de traction par flexion des bétons de sable à base de CA | 79 |
| Figure IV.7: Résistances en compression et en traction par flexion des bétons de sable à base de cendres de canne | 80 |
| Figure IV.8: Corrélacion des résistances de compression vs traction par flexion des bétons de sable à base de cendres de canne | 81 |

| | |
|---|-----|
| Figure IV.9: Effet de la durée de cure sur la densité à l'état durci des bétons de sable à base de cendres de canne | 82 |
| Figure IV.10: Effet % CA sur la densité à l'état durci des bétons de sable à base de CA | 82 |
| Figure IV.11: Corrélation de la densité vs les résistances mécaniques à 28jours | 83 |
| Figure IV.12: Effet % CA sur le MOE du béton de sable à base d'ajout CA | 84 |
| Figure IV.13: Corrélations MOE vs la densité à 28 jours des bétons de sable à base de CA | 85 |
| Figure IV.14: Corrélations MOE vs la résistance Rc28 des bétons de sable à base de CA | 85 |
| Figure IV.15: Corrélations MOE vs UPV à 28jours des bétons de sable à base de CA | 86 |
| Figure IV.16: Effet % CA sur l'indice sclérométrique et la dureté de surface à 28jours des bétons de sable à base de CA | 86 |
| Figure IV.17: Corrélation indice RHN vs Rc28 par RHN et par compression des bétons de sable à base de CA | 87 |
| Figure IV.18: Effet % CA sur la vitesse aux ultrasons des bétons de sable à base de CA | 88 |
| Figure IV.19: Corrélations de la vitesse aux ultrasons vs la résistance Rc28 des bétons de sable à base de CA | 89 |
| Figure IV.20: Corrélation de la vitesse aux ultrasons vs l'indice sclérométrique RHN des bétons de sable à base de CA | 90 |
| Figure IV.21: Corrélation de la résistance UPV vs la résistance RHN des bétons de sable à base de CA | 90 |
| Figure IV.22: Effet % CA sur la résistance combinée des bétons de sable à base de CA | 91 |
| Figure IV.23: Corrélation de la résistance combinée vs la résistance Rc28 par écrasement | 92 |
| Figure IV.24: Schémas DRX du béton de sable témoin (CC0) | 92 |
| Figure IV.25: Schémas DRX du béton de sable à base d'ajout CA (CC8) | 93 |
| Figure IV.26: (a) Diffractogrammes DRX du béton de sable témoin (CC0) et à base d'ajout (CC8); (b) Superposition de diffractogrammes DRX des bétons de sable CC0 et CC8 | 94 |
| Figure IV.27 (a-d): Micrographies MEB des bétons de sable CC0 et CC8 | 95 |
| Figure IV.28: Micrographies MEB et les spectres EDAX du témoin CC0 : (a) x322, (b) x428, (c) x757, (d) x1513, (e) x3175 | 97 |
| Figure IV.29: Micrographies MEB et les spectres EDAX du béton CC8 : (a) x300, (b) x400, (c) 2709, (d) x2709, (e) x3551 | 98 |
| Figure V.1: Effet % des cendres CA sur l'absorption par immersion des bétons de sable | 102 |
| Figure V.2: Corrélation de l'absorption par immersion vs la densité à 28jours. | 103 |
| Figure V.3: Effet % des cendres de canne sur l'absorption capillaire des bétons de sable | 104 |
| Figure V.4: Effet % des cendres de canne sur la sorptivité des bétons de sable | 104 |
| Figure V.5 : Effet % des cendres de canne sur la profondeur de pénétration et le coefficient de diffusion apparent des chlorures | 106 |
| Figure V.6 : Effet % des cendres de canne sur la profondeur de pénétration des chlorures en fonction de la racine carrée du temps d'immersion | 106 |
| Figure V.7 : Corrélations entre le coefficient de diffusion apparent vs la profondeur de pénétration des chlorures | 107 |
| Figure V.8: Variation du gain de masse en fonction du % des cendres de canne | 108 |
| Figure V.9: Variation du gain de masse en fonction du temps d'immersion après 120 jours d'attaque par les chlorures | 108 |
| Figure V.10 : Variation de la densité en fonction du % des cendres de canne après l'attaque par les chlorures | 109 |
| Figure V.11: Variation du gain de masse (5% NaCl) en fonction de la densité des bétons de sable à base de cendres de canne | 109 |
| Figure V.12: Perte de masse des bétons de sable à base de cendres de canne (CA) en | 111 |

| | |
|--|-----|
| fonction de la période d'immersion dans 5% HCl | |
| Figure V.13: Perte de volume des bétons de sable à base de cendres de canne à 28 jours et 120 jours d'immersion dans 5% HCl | 113 |
| Figure V.14: Perte de masse des bétons de sable à base de CA en fonction de la période d'immersion dans 5% H ₂ SO ₄ | 115 |
| Figure V.15: Perte de volume des bétons de sable à base de cendres de canne à 28 jours et 120 jours d'immersion dans 5% H ₂ SO ₄ | 118 |
| Figure V.16: Perte de masse des bétons de sable à base de CA en fonction de la période d'immersion dans 5% HNO ₃ | 120 |
| Figure V.17: Perte de volume des bétons de sable à base de cendres de canne à 28 jours et 120 jours d'immersion dans 5% HNO ₃ | 123 |
| Figure V.18: Perte de masse des bétons de sable à base de CA en fonction de la période d'immersion dans 5% CH ₃ COOH | 124 |
| Figure V.19: Perte de volume des bétons de sable à base de cendres de canne à 28 jours et 120 jours d'immersion dans 5% CH ₃ COOH | 126 |
| Figure V.20: Perte de masse des bétons de sable à base de cendres de canne dans les solutions acides à 5% de : HCL, H ₂ SO ₄ , HNO ₃ , CH ₃ COOH à 28 et 120 jours | 127 |
| Figure V.21: Variation de volume des bétons de sable à base de cendres de canne dans les solutions acides à 5% de: HCL, H ₂ SO ₄ , HNO ₃ , CH ₃ COOH à 28 et 120 jours d'immersion | 128 |
| Figure V.22: Gain de masse des bétons de sable à base de CA en fonction de la période d'immersion dans 5% NaOH. | 129 |
| Figure V.23: Variation de volume des bétons de sable à base de cendres de canne à 28 jours et 120 jours d'immersion dans 5% NaOH | 130 |
| Figure V.24: Gain de masse des bétons de sable à base de CA en fonction de la période d'immersion dans 5% MgSO ₄ | 131 |
| Figure V.25: Variation de volume des bétons de sable à base de cendres de canne à 28 jours et 120 jours d'immersion dans 5% MgSO ₄ | 134 |
| Figure V.26: Spécimens de béton de sable à base de cendres de canne (CA) après 105 jours d'exposition aux solutions d'attaque chimiques. | 135 |
| Figure V.27: Aspects des spécimens de béton de sable après 28 et 120 jours d'exposition aux solutions d'attaque chimiques | 136 |

Liste des tableaux

| | |
|--|-----|
| Tableau I.1: Répartition de produits agricoles et de leurs résidus par pays (en millions de tonnes) selon Pandey and Kumar (2022) | 8 |
| Tableau I.2: Compositions chimiques de divers agro-cendres (en %) sélectionnées dans la littérature (Thomas et al., 2021) | 16 |
| Tableau II.1: Composition chimique du ciment | 39 |
| Tableau II.2: Composition minéralogique du ciment | 39 |
| Tableau II.3: Caractéristiques physiques et mécaniques du ciment | 39 |
| Tableau II.4: Composition chimique des cendres de canne (en %) | 40 |
| Tableau II.5: Caractéristiques physiques des cendres de canne | 40 |
| Tableau II.6: Composition chimique du sable de dunes d'Oued Zhor | 41 |
| Tableau II.7: Caractéristiques physiques du sable de dune | 41 |
| Tableau II.8: Composition chimique des fillers calcaires | 43 |
| Tableau II.9: Caractéristiques physiques des fillers calcaires | 43 |
| Tableau II.10: Caractéristiques de l'adjuvant | 44 |
| Tableau II.11: Analyse chimique de l'eau | 44 |
| Tableau III.1: Compositions des bétons de sable | 53 |
| Tableau III.2: Formulations des bétons de sable à base des cendres de canne (pour un 1m^3) | 53 |
| Tableau III.3: Paramètres et essais effectués sur le béton de sable à base de cendres | 54 |
| Tableau III.4: Essais, dimensions des éprouvettes et modes de conservation | 57 |
| Tableau IV.1: Formules de corrélation des résistances de compression vs celles de traction par flexion des bétons de sable à base de cendres de canne. | 81 |
| Tableau IV.2: Formules de corrélation des résistances de compression vs celles de traction par flexion des bétons de sable à base de cendres de canne. | 83 |
| Tableau IV.3: Formules de corrélation du MOE vs la densité, la résistance à la compression R_c , UPV à 28 jours des bétons de sable à base de cendres de canne. | 85 |
| Tableau IV.4: Formules de corrélation de l'indice RHN vs les résistances de compression par RHN et par écrasement des bétons de sable à base de cendres de canne | 87 |
| Tableau IV.5: Formules de corrélation de l'UPV vs la résistance R_{c28j} , la résistance par UPV à 28 jours des bétons de sable à base de cendres de canne. | 89 |
| Tableau IV.6: Formules de corrélation de RHN vs UPV, la résistance par UPV à 28 jours des bétons de sable à base de cendres de canne. | 90 |
| Tableau IV.7: Formule de corrélation de la résistance par la méthode combinée vs la résistance de compression R_{c28} des bétons de sable à base de cendres de canne | 91 |
| Tableau V.1: Formule de corrélation de l'absorption par immersion et de la densité des bétons de sable à base de cendres de canne. | 103 |
| Tableau V.2: Formules de corrélation du coefficient de diffusion des chlorures et de la profondeur de pénétration dans les bétons de sable à base de cendres de canne. | 107 |
| Tableau V.3: Formules de corrélation du gain de masse (5% NaCl) et de la densité des bétons de sable à base de cendres de canne. | 110 |

Introduction

Générale

Introduction générale

L'utilisation des déchets agricoles en tant que ressources efficaces pour produire des matériaux écologiques pour la construction durable, est devenue la tendance actuelle dans de nombreux pays à travers le monde. Les chercheurs dans ce domaine ont évalué la performance de leur utilisation comme ressources efficaces pour la production de ces matériaux respectueux de l'environnement, notamment dans des environnements agressifs, afin de réduire l'épuisement des ressources naturelles et les coûts associés à la valorisation de certains sous-produits industriels.

De plus, la conversion des déchets agricoles en matériaux cimentaires nécessite moins d'énergie que celle nécessaire à la fabrication du ciment conventionnel, et l'ajout de ces matériaux permet de résoudre les problèmes environnementaux croissants en réduisant l'empreinte carbone engendrée par les émissions de CO₂ lors de la production du ciment dont la demande ne cesse d'augmenter pour les infrastructures de génie civil. En effet, il a été estimé qu'une tonne de ciment libère 800 kg de CO₂ dans l'atmosphère. Selon la littérature, la tendance future des travaux se concentrera de plus en plus sur l'utilisation des cendres agricoles, les plus durables de tous les ajouts cimentaires, compte tenu du CO₂ émis lors de leur calcination est compensé par le CO₂ absorbé pendant le cycle de vie de la plante [60].

Des recherches ont démontré l'importance de la valorisation de cendres de déchets agricoles, telle que: les cendres de balle de riz, les cendre de bagasse de canne à sucre, les cendre de feuilles de bambou, entre autres, comme ajouts cimentaires à des dosages appropriés pour améliorer les performances du ciment, et par conséquent les propriétés des bétons et mortiers, car ce sont principalement des matériaux pouzzolaniques. Les pistes d'améliorations portent sur l'ouvrabilité, les propriétés mécaniques et la durabilité à long terme jusqu'à un niveau de remplacement optimal [38], et il a même été démontré que le béton à base d'agro-ciment est plus léger que le béton ordinaire. Les agro-ciments réduisent également les attaques de chlorure et les sulfates et la chaleur d'hydratation. Ce qui a incité les chercheurs à évaluer la durabilité du béton à base d'agro-ciment pour certaines utilisations spécifiques et/ou dans des conditions environnementales difficiles provenant de diverses sources telles que les procédés industriels, l'environnement marin, les eaux souterraines, les pluies acides, les eaux naturelles chargées en dioxyde de carbone, et aussi les eaux pures, dont l'impact peut entraîner divers problèmes tels que la fissuration, l'écaillage ou la décoloration par la rouille, réduisant ainsi la durabilité et la durée de vie des ouvrages en béton. D'où, la nécessiter de réparation coûteuse, voire une reconstruction partielle, si leur composition n'est pas correctement optimisée. Dans les pays développés, environ 40 % des ressources de construction sont généralement allouées à la réparation et à l'entretien, les 60 % restants étant dédiés aux constructions nouvelles.

Les études sur les nouvelles applications des ajouts cimentaires à base de cendres agricoles progressent continuellement, et des recherches supplémentaires sont nécessaires pour comprendre leur comportement dans les conditions difficiles et pour étudier les effets à long terme [34]. Le type de liant et la qualité de la matrice cimentaire sont des facteurs clés qui influent sur le comportement. Ainsi, il est crucial d'identifier les compositions de liants appropriées et l'optimisation des mélanges pour améliorer les performances en termes de résistance et de durabilité du béton et des composites cimentaires, même dans des environnements agressifs. Toutefois, selon Fadele., (2022) les variations de comportement de certains agro-ciments et l'insuffisance des informations dans la littérature soulignent la nécessité de mener des recherches plus approfondies sur l'utilisation des cendres agricoles

comme agro-ciments, en particulier la bagasse de canne à sucre (SCBA), un déchet agricole des industries de sucre en augmentation chaque année et représentant environ 60 à 70 % de la production mondiale de sucre. Bien qu'elle soit encore peu exploitée, il est nécessaire d'améliorer la compréhension de l'impact de ses propriétés sur le comportement du système cimentaire pour le développement des normes d'utilisation.

Les études sur l'effet des agro-ciments sur le béton de sable exposé à des milieux agressifs ne sont pas largement rapportées. C'est dans cette optique que la présente étude a été entreprise, avec pour objectif de valoriser les cendres de canne, provenant d'un déchet agricole localement disponible, en tant que matériau de construction écologique, économique et technique. Il s'agit de remplacer partiellement le ciment par les dites cendres pour produire un éco-matériau durable tel que le béton de sable, et d'évaluer son comportement physico-mécanique ainsi que la durabilité de ces matériaux dans diverses conditions environnementales difficiles y compris l'exposition à des acides, des bases, des sulfates, des chlorures et l'absorption d'eau. Cela pourrait être une solution rentable aux coûts élevés de maintenance et de réparation des dommages causés aux bétons. La caractérisation physico-chimique et minéralogique des cendres de canne a révélé leur potentiel et les opportunités qu'elles offrent en tant que matière première dans le domaine des matériaux de construction.

La présente thèse est structurée en cinq (05) chapitres:

Le premier chapitre, est une synthèse bibliographique, ou nous avons signalé l'importance de la valorisation des cendres dans le domaine de génie civil. Nous avons également mentionné les divers types de cendres, notamment les cendres de canne, ainsi que les travaux antérieurs ayant utilisé ce matériau dans le domaine de génie civil.

Le deuxième chapitre porte sur la caractérisation des matériaux utilisés dans cette étude, ainsi que les divers essais de caractérisation effectués et les résultats spécifiques obtenus pour chacun d'entre eux. Notamment, une analyse comparative entre le ciment et les cendres de canne sur les aspects physico-chimique et morphologique afin de mieux comprendre son comportement dans la matrice cimentaire.

Le troisième chapitre décrit le programme expérimental, la méthode de formulation de ce type de béton, les formulations retenues des mélanges avec et sans ajout, les méthodes de fabrication des mélanges pour chaque essai, les techniques de confection et de conservation des éprouvettes, ainsi que la méthodologie de l'ensemble des essais normalisés y compris la description de leurs modes opératoires dans le cadre du programme expérimental arrêté.

Le quatrième chapitre exposera les résultats et les discussions de l'effet du taux de remplacement et du type de cendres sur les propriétés physiques et mécaniques des bétons de sable, à l'état frais (la densité, l'ouvrabilité et l'air occlus), ainsi que les performances mécaniques (la résistance en compression et en traction par flexion, la dureté de surface et l'homogénéité, la densité et le module d'élasticité à l'état durci), en analysant dans cette partie l'ensemble des résultats obtenus. Une analyse de la microstructure a été également réalisée par diffraction des rayons X (DRX) et par microscopie électronique à balayage (MEB), complétée par une analyse par rayons X à dispersion d'énergie (EDAX). Les résultats de notre programme expérimental sont comparés aux résultats expérimentaux issus de la littérature.

Dans le cinquième chapitre, nous considérons les résultats et les discussions de l'effet du taux de remplacement et du type de cendres sur les paramètres de durabilité des bétons de sable, telles que l'absorption capillaire et par immersion, les résistances chimiques dans sept environnements agressifs différents à 5% de concentration : solution d'acide chlorhydrique, d'acide sulfurique, d'acide nitrique, d'acide acétique, solution basique de l'hydroxyde de sodium, solution de sulfate de magnésium, ainsi que la solution de chlorure de sodium.

Enfin, une conclusion générale englobant les principaux résultats obtenus et conclusions, soulignant ainsi la contribution globale de cette étude. Des recommandations sont également fournies pour orienter des travaux futurs.

Chapitre I

Synthèse bibliographique

I. Synthèse bibliographique

I.1. Introduction

Dans ce chapitre une synthèse bibliographique est présentée concernant la valorisation des déchets agricoles permettant de produire des matériaux écologiques et efficaces pour la construction durable. Étant donné que les travaux de recherches se focalisent de plus en plus sur la recherche d'alternatives par l'exploration d'autres sources d'approvisionnement en granulats et/ou en ajouts cimentaires pour le secteur des matériaux de construction. La tendance actuelle et future se concentrera de plus en plus sur l'utilisation des cendres agricoles, qui sont les plus durable de tous les ajouts cimentaires, dans le but de réduire l'épuisement des ressources naturelles et les coûts liés à la valorisation de certains sous-produits industriels, à la gestion et à l'élimination des déchets, tout en réduisant l'empreinte carbone associés à la production de ciment.

En premier lieu, les connaissances les plus pertinentes concernant la valorisation des cendres de déchets agricoles comme ajout cimentaire dans le domaine du génie civil, seront examinées. La littérature existante nous renseigne sur les différents types de cendres provenant des déchets agricoles les plus fréquemment utilisées ainsi que sur leurs origines et leurs effets sur les caractéristiques mécaniques et de durabilité du béton à base d'agro-ciments. Ensuite, nous examinerons de plus près la valorisation des cendres de canne issues de déchets agricoles et les travaux de recherche antérieurs sur ce sujet.

I.2. Valorisation des cendres de déchets agricoles dans le domaine de génie civil

I.2.1. Introduction

Les déchets agricoles représentent plus de 50% de la biomasse agricole mondiale (Lozano & Lozano, 2018). Toutefois, seulement des proportions limitées de ces déchets sont employés dans la production de papier ou le traitement en panneaux; la plupart sont soit laissés sur place, soit brûlés par les agriculteurs, ce qui occupe non seulement des superficies de terres importantes, mais détruit également l'environnement. Ainsi, transformer les résidus agricoles en matériaux de construction durable et à faible consommation d'énergie pourrait être une solution pratique pour préserver la nature, et l'environnement.

Récemment, avec le développement des aspects socio-économiques et les progrès de la science et de la technologie, l'utilisation des déchets agricoles est en plein essor en raison de leur disponibilité et de leur faible coût. Les déchets de l'agriculture offrent des avantages potentiels en tant que matériaux de remplacement dans l'industrie de la construction, en particulier dans les pays produisant une grande quantité de matières premières agricoles (Frías-Rojas et al., 2017; He et al., 2020; Magar, 2020).

Blesson et Rao (2023) ont mentionné, dans leur étude portant sur les déchets agricoles, qu'annuellement, 70 millions de tonnes de cendres de balle de riz sont générées à l'échelle mondiale. Environ 40 millions de tonnes par an proviennent des déchets des moulins à olives, environ 45 millions de tonnes/an des cendres de bagasse de canne à sucre et 30.5 millions de

tonnes/an des cendres des tiges de maïs. La quantité restante émane d'autres déchets agricoles et agroalimentaires, comme illustré dans la Figure I.1.

Aussi, étant donné l'abondance de ces résidus agricoles, il est envisageable de les intégrer dans le domaine du génie civil, à l'industrie du bâtiment en association avec du ciment pour la fabrication de divers matériaux de construction tels que des trottoirs, du crépi, des pavés et des joints...etc. Lorsqu'ils sont disponibles en grande quantité, ces matériaux s'avèrent être plus économiques. Leur utilisation varie selon le contexte, qu'il s'agisse d'un ajout au ciment en substitution à celui-ci pour des propriétés accrues de résistance et de durabilité ou en remplacement des granulats fins comme filler (Xu et al., 2018).

Pandey et Kumar (2022) ont reporté que les résidus agricoles sont considérablement moins chers, ce qui augmente en conséquence les possibilités de les utiliser comme ajouts cimentaires significativement peu coûteux. Le Tableau I.1 présente la quantité de différents produits et résidus agricoles produits dans différents pays, ainsi que la quantité de cendres générées par la combustion de ces déchets agricoles (sur la base des études antérieures). Les pays mentionnés dans le Tableau I.1 ont été sélectionnés en raison de leur forte densité démographique et de leur activité agricole prépondérante sur leur continent.

Avant d'introduire de nouveaux types d'ajouts, il est essentiel d'évaluer leurs performances après avoir caractériser leurs propriétés physico-chimiques et minéralogiques pour en évaluer le potentiel de valorisation.

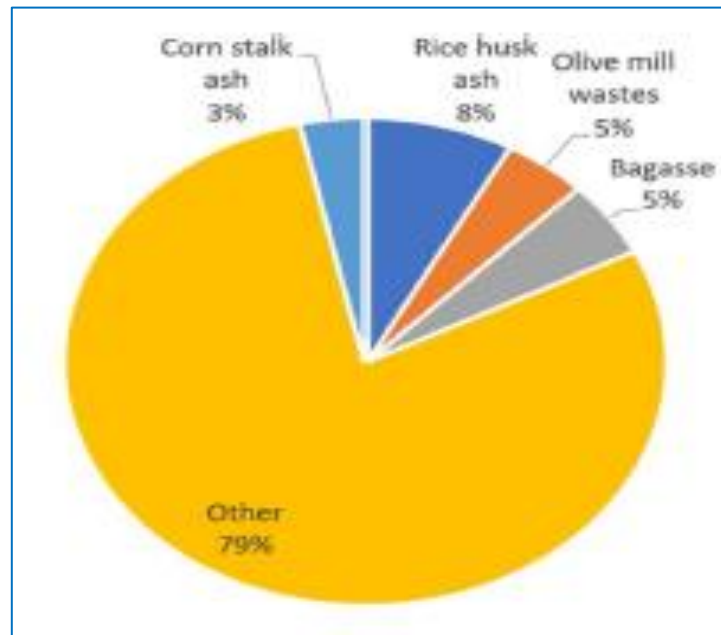


Figure I.1: Cendres de déchets agricoles et résidus agro-alimentaires produits (Blesson et Rao, 2023)

Tableau I.1: Répartition de produits agricoles et de leurs résidus par pays (en millions de tonnes) selon Pandey et Kumar (2022), (Nigam and Pandey 2009; Ferreira-Leitao et al. 2010; Forster-Carneiro et al., 2013; NPMCR 2014; Aprianti et al., 2015; Devi et al., 2017; Bhuvaneshwari et al., 2019; FAOSTAT 2020; IndexMundi 2020; Statista 2020)

| Country | Rice | | | Corn | | Palm oil | | Sugarcane | |
|-----------|---------|--------------|---------------|---------|---------------|----------|----------------------|-----------|----------------|
| | Product | Husk | Straw | Product | Cob | Product | Residue ^a | Product | Bagasse |
| Australia | 0.64 | 0.13 (0.02) | 1.58 (0.35) | 0.39 | 0.09 (0.02) | - | - | 33.51 | 10.05 (2.41) |
| Brazil | 11.75 | 1.33 (0.27) | 16.18 (3.56) | 82.29 | 18.1 (3.62) | 0.54 | 0.22 (0.04) | 746.83 | 224.05 (53.77) |
| China | 214.08 | 43.23 (7.78) | 251.7 (55.37) | 257.33 | 56.60 (11.32) | 0.23 | 0.09 (0.02) | 108.72 | 32.62 (7.83) |
| France | 0.07 | 0.02 (0.004) | 0.12 (0.03) | 12.67 | 2.79 (0.56) | - | - | 2.27 | 0.68 (0.16) |
| India | 172.58 | 34.52 (6.9) | 201 (44.22) | 27.82 | 6.12 (1.22) | 0.2 | 0.08 (0.02) | 376.9 | 113.07 (27.14) |
| Indonesia | 83.04 | 16.41 (2.88) | 98.44 (21.66) | 30.25 | 6.65 (1.33) | 42.5 | 17 (3.74) | 21.74 | 6.52 (1.57) |
| Thailand | 32.19 | 6.1 (1.1) | 42 (9.24) | 5.1 | 1.12 (0.22) | 3 | 1.2 (0.26) | 104.36 | 31.31 (7.51) |
| Uganda | 0.26 | 0.06 (0.01) | 0.36 (0.08) | 2.96 | 0.65 (0.13) | 0.15 | 0.06 (0.01) | 3.98 | 1.19 (0.29) |
| USA | 10.17 | 2.03 (0.37) | 12.18 (2.68) | 392.45 | 86.32 (17.26) | - | - | 31.34 | 9.40 (2.26) |

-Les chiffres entre parenthèses représentent la quantité potentielle de cendres (en millions de tonnes) produites par la combustion des résidus agricoles.

-Residue^a : les résidus d'huile de palme comprennent les coques de palmier à huile, les grappes de fruit vides, et les fibres.

I.2.2. Valorisation des déchets agricoles dans le béton

Le processus de valorisation des déchets agricoles dans la fabrication du béton est généralement effectué par deux méthodes distinctes telles que reporté par He et al., (2020).

-Sans procédé chimique, où les déchets sont traités de manière physique, tels que par découpage, afin de les incorporer dans le béton sans compromettre ses performances.

-Par combustion et/ou par traitement chimique, les résidus agricoles brûlés peuvent être soumis à un processus de tamisage visant à éliminer les substances non-brûlées ou être incinérés puis broyés jusqu'à atteindre une finesse spécifique, comme montré sur les Figures I.2-I.4. Ces matériaux peuvent également subir des traitements chimiques. Ces procédés leur permettent de remplacer partiellement les fillers, ou le ciment. Les mélanges à base d'agro-résidus ont démontré leur efficacité en étant incorporés au ciment Portland comme ajout cimentaire à des dosages appropriés, ce qui a pour conséquence d'améliorer les propriétés des bétons, mortiers, et plus généralement des pâtes cimentaires.

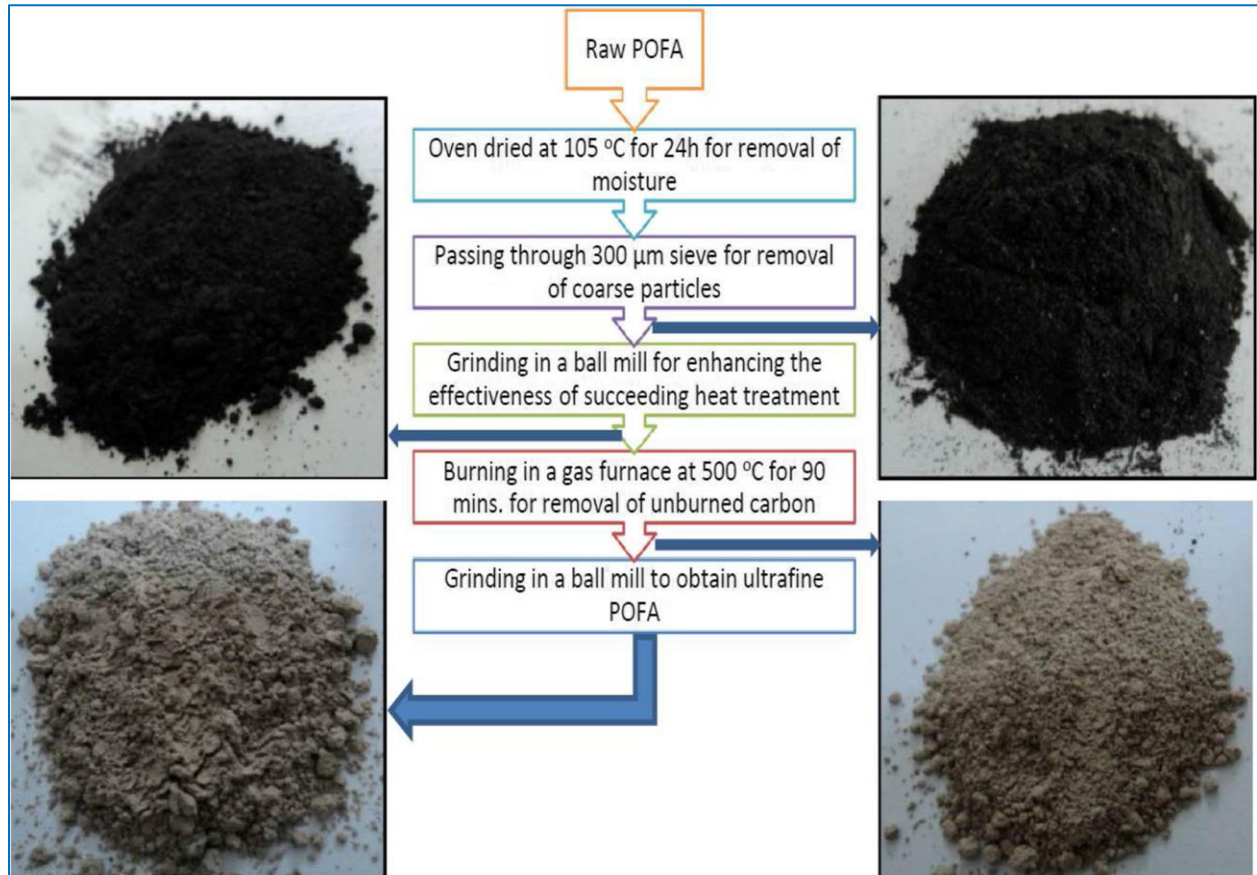


Figure I.2: Transformation des cendres non traitées de palmier à huile (POFA) en cendres ultrafines avec la modification de leur couleur à chaque phase du processus (Zeyad et al., 2017)

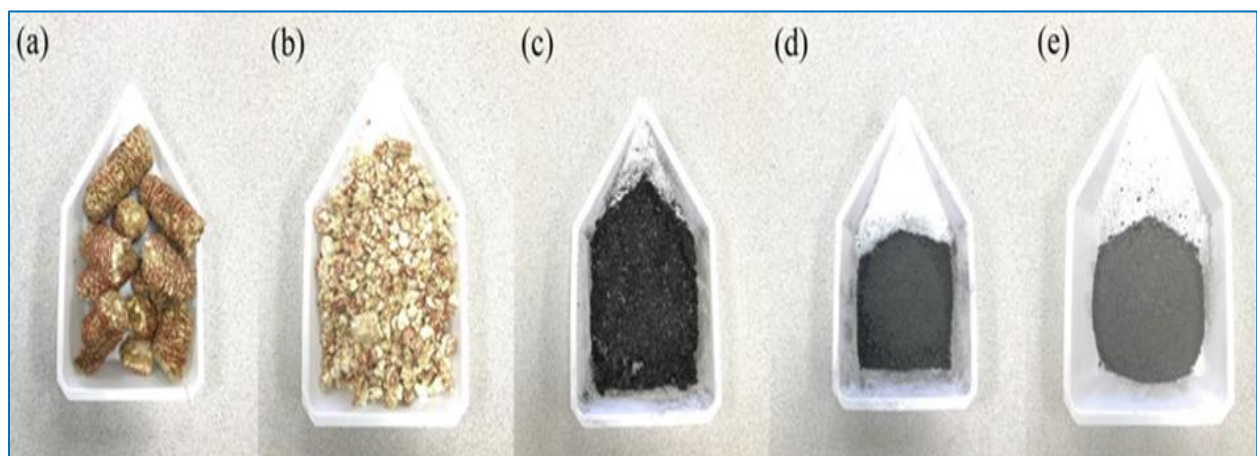


Figure I.3: (a) Epi de maïs brut, (b) Epi de maïs moulu, (c) Epi de maïs brûlé dans un four cyclonique, (d) Cendres d'épi de maïs CCA calcinées dans un four à moufle, et (e) Cendres CCA broyées dans un broyeur à boulets (Shakouri et al., 2020)



Figure I.4: (a) Four rotatif pour la calcination des pailles de blé à différentes températures variant de 550 à 750 °C ; (b) Broyeur à boulets pour le broyage des cendres de pailles de blé brûlées (Amin et al., 2019)

I.2.3. Valorisation des déchets agricoles comme pouzzolane active pour le ciment

Les matériaux activés alcalin, en tant que type de liant, représentent une nouvelle tendance dans le domaine des matériaux de construction et des structures (Figure I.5). Des études ont montré que les cendres de bagasse de canne à sucre (SBCA), combinées à des bases de liants activés par les alcalis sur du laitier de haut fourneau, étaient un matériau activé alcalin efficace, servant également de source de silicium dans les matériaux activés alcalin (Moraes et al., 2017).

Les cendres de feuilles de bambou (BLA), de balle de riz (RHA) et de bagasse de canne à sucre (SCBA), issues de la combustion de déchets agricoles, sont connues pour leur nature amorphe avec une forte teneur en silice et une réactivité pouzzolanique élevée lorsqu'elles sont utilisées comme liants pour la fabrication du béton (He et al., 2020; Raghav et al., 2021; Thomas et al., 2021).

Des recherches approfondies ont montré que la nature pouzzolanique de SCBA et de la RHA (Figure I.6) améliore la structure des pores dans le mortier et le béton, ce qui réduit significativement la perméabilité face à la pénétration de l'eau, des sulfates et des chlorures (Chopperla et al., 2019). Les cendres de bagasse de canne à sucre ont également été largement recommandées comme matériau pouzzolanique dans de nombreuses études (Agwa et al., 2022), pour améliorer les performances du ciment, et par conséquent les propriétés des bétons et des mortiers (Raheem et Ikotun, 2020; Aprianti et al., 2015; Fadele et Otieno, 2022).

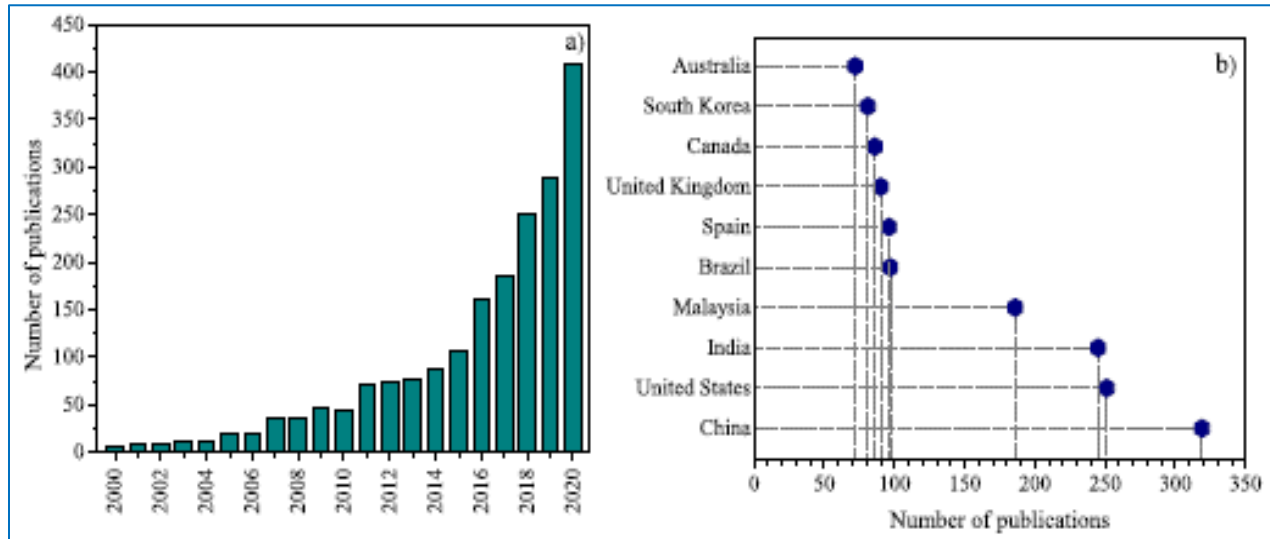


Figure I.5: Nombre de publications sur l'application des cendres de déchets agricoles dans le ciment (a) Au cours des années (b) De différents pays (Charitha et al., 2021)

Additivement aux avantages techniques potentiels, l'utilisation de déchets agricoles en tant qu'ajout cimentaire alternatif peut contribuer à la réduction des coûts de production du béton, à la diminution de la consommation de ciment et par conséquent à la réduction des émissions de CO₂ (Chandra et al., 2019).

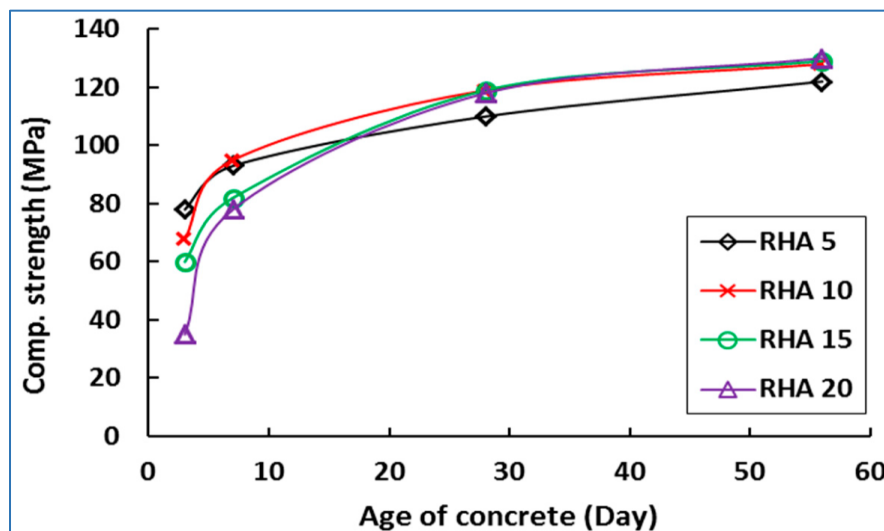


Figure I.6: Influence des cendres de balle de riz (RHA) sur le développement de la résistance à la compression du béton (Le et Ludwig., 2016)

I.2.4. Valorisation des déchets agricoles comme filler dans le mélange de béton bitumineux

La gestion des déchets agricoles est un sujet d'étude majeur en raison de leur production abondante dans de nombreuses régions du monde. L'utilisation des déchets agricoles comme filler dans le béton bitumineux est encouragée par des politiques environnementales en raison de leurs performances spécifiques. De nombreux chercheurs se sont penchés sur l'utilisation de

différents types de déchets tels que les cendres d'incinération municipales ou les déchets céramiques comme charge minérale dans le béton bitumineux. Les cendres de biomasse constituent une alternative durable et économique pour les matériaux de construction, pouvant également être utilisées comme charge minérale dans les mélanges d'asphalte (Melotti et al., 2013).

Les chercheurs ont étudié l'utilisation des cendres de balle de riz (RHA) comme charge dans le béton bitumineux mélangé à chaud (Al-Hdabi, 2016). Leurs conclusions soulignent que la substitution de la charge minérale par les cendres de balle de riz peut remplacer la charge minérale conventionnelle et permet aussi de réduire le problème d'élimination des déchets agricoles. Une autre étude a été menée en vue de combiner deux types de cendres de déchets agricoles, à savoir les cendres de graines de dattes (DSA) et les cendres de balle de riz (RHA), afin de substituer la charge conventionnelle. Les résultats suggèrent que le pourcentage optimal pourrait être fixé à 100% de DSA, tandis que les mélanges d'asphalte chaud avec une substitution de 75% en RHA ont démontré une performance satisfaisante. Dans l'ensemble, l'utilisation conjointe de RHA et de DSA a conduit à une amélioration notable de la stabilité Marshall, la rigidité, et les performances en matière de fatigue des mélanges bitumineux. De plus, en comparaison avec le mélange de référence, l'ajout de RHA et de DSA dans le béton bitumineux mélangé à chaud a démontré une amélioration de la résistance à la fatigue. Par conséquent, il est à noter que la durée de vie en fatigue du béton obtenu sera prolongée grâce à l'utilisation d'agro-déchets (Tahami et al., 2018). En incorporant du ciment à hauteur de 2% en tant que charge conventionnelle pour la préparation de l'asphalte, il a été démontré que diverses quantités de RHA (de 2% à 4%) en tant que substitution se révélaient plus efficaces qu'une charge minérale, en réduisant la quantité optimale de bitume dans un mélange de béton bitumineux (He et al., 2020).

I.3. Effet des agro-ciments provenant des déchets agricoles sur les propriétés des bétons

I.3.1. Effet des agro-ciments sur la résistance mécanique

Les études sur les cendres de déchets agricoles utilisées comme ajout cimentaire dans le béton ne cessent d'augmenter ces dernières années afin d'évaluer leur effet sur les caractéristiques du béton à base d'ajout. Des études menées par Jagadesh et al., (2018) et par Xu et al., (2018) ont montré que l'utilisation des agro-ciments tels que les cendres de bagasse canne à sucre, de bambou, etc. dans les bétons et les mortiers a des effets positifs sur leurs propriétés mécaniques, particulièrement à long terme et jusqu'à un niveau de remplacement optimal. Cependant, Nwankwo et al., (2020) et Onyenokporo (2022) ont signalé que les dosages plus importants des agro-ciments, augmentent la demande en eau en même temps que les temps de prise du béton, entraînant une diminution de leur résistance.

Il a été démontré que l'utilisation de cendres de balles de riz (RHA) en tant que charge minérale mélangée dans le béton bitumineux, a révélé une résistance à la traction presque 10% plus élevée par rapport à celle du témoin (Al-Hdabi, 2016).

Les déchets agricoles peuvent accélérer la formation de C-S-H par le biais de la réaction pouzzolanique, en raison de leur concentration élevée en silice (Blesson et Rao, 2023).

Toutefois, la teneur croissante en résidus agricoles réduit la résistance à la compression. Les travaux de recherche indiquent que les liants ternaires offrent plus de possibilités que les liants binaires. En effet, un ciment ternaire RHA-SCBA a été présenté comme un béton haute performance, où le RHA a joué un rôle majeur dans l'amélioration de la résistance à la compression en raison de son activité pouzzolanique plus élevée (Cordeiro et al., 2012). Toutes ces études ont impliqué l'application potentielle des résidus agricoles, tout en réduisant simultanément leur élimination dans l'environnement.

I.3.2. Effet des agro-ciments sur la perméabilité et les paramètres de durabilité

La résistance à la pénétration des ions chlorures reflète la résistance de la capacité de perméabilité, souvent utilisée dans l'évaluation de la conductivité électrique des matériaux cimentaires partiellement remplacés. Les performances de diverses cendres de déchets agricoles, y compris les cendres de balle de riz et les cendres de combustible à base d'huile de palme, entre autres, ont été évaluées dans le béton, et la plupart des résultats ont montré un effet significatif de ces matériaux pouzzolaniques pour améliorer la durabilité du béton résultant en réduisant la perméabilité aux ions chlorure (Alsubari et al., 2018; Xu et al., 2018; Samreen et al., 2022). Sur la base des tests d'absorption d'eau et de perméabilité, il a été constaté que les cendres de balle de riz dans le béton ont entraîné une réduction de l'absorption d'eau et de la perméabilité de 26% et 78% respectivement, par rapport au témoin (Zareei et al., 2017). Inversement, les résultats étaient très sensibles à la carbonatation (Aprianti et al., 2015; Ammari et al., 2020). Ce qui a incité les chercheurs à évaluer la durabilité du béton à base d'agro-ciment indépendamment de l'effet de carbonatation pour certaines utilisations spécifiques. Toutefois, les variations de comportement de certains agro-ciments et l'insuffisance des informations mentionnées dans la littérature, indiquent la nécessité de mener des recherches plus approfondies (Fadele et Otieno, 2022).

D'autres paramètres de durabilité liés à l'utilisation de certains déchets agricoles dans le ciment, tels que la résistance au gel/dégel, l'attaque chimique, le temps de prise (y compris initial et final), la carbonatation, l'absorption d'eau et les tests d'expansion, ont aussi été examinés. Le pourcentage d'expansion reflète également que le ciment ou le ciment à base d'ajout dans des conditions de solution de sulfate ou de solution acide entraînent une modification du volume de la matrice. En raison des propriétés intrinsèques des déchets agricoles, des études indiquent qu'un taux de remplacement plus élevé des déchets agricoles pourrait augmenter le rapport eau/liant, qui se traduit par une résistance plus faible lors de l'attaque par les sulfates ou les chlorures (Tangchirapat et al., 2007). Cependant, il a été confirmé que l'incorporation de déchets agricoles finement broyés dans le ciment permet une meilleure résistance à la pénétration de CO₂ (Al-Mulali et al., 2015). La présence de particules de silice supplémentaires fournies par l'agro-ciment peut accélérer la réaction pouzzolanique et créer une matrice de ciment consolidée qui peut résister à l'attaque du CO₂ supercritique. La résistance au gel/dégel est un indicateur important de la durabilité du béton, et des études ont montré que l'ajout de particules plus fines de déchets agricoles améliore d'avantage cette résistance (Prusty et al., 2016). Un bon comportement de durabilité a également été observé en termes de résistance à l'abrasion, à l'acide sulfurique et au chlorure (Raheem et Ikotun, 2020).

I.3.2.1. Attaque chimique

La capacité du béton à résister à divers environnements agressifs est un problème clé de durabilité affectant les performances des structures en béton, notamment lorsqu'elles sont attaquées par du sulfate ambiant et d'acides environnants, entraînant ainsi une attaque chimique. La nature poreuse du béton facilite la pénétration des substances acides, en réaction avec les produits hydratés, tels que le $\text{Ca}(\text{OH})_2$ et C-S-H, formant du gypse et de l'ettringite, qui se dilatent et finissent par endommager la surface du béton. En cas d'attaque acide par exemple à l'acide chlorhydrique, la neutralisation progressive de la matrice de cimentaire de nature alcaline produit du sel de CaCl_2 soluble et de l'eau, illustré par les équations (I.1) et (I.2).



Une étude a exploité une tension imposée pour le ciment à base de cendres de balle de riz blanches dans un test de corrosion accéléré qui a permis d'obtenir des informations sur propriétés de perméabilité du béton (Ferraro et Nanni, 2012). Les résultats des tests ont montré que le remplacement de 15% du ciment avait la résistivité optimale pour prévenir l'érosion.

Une recherche menée sur le béton à base d'agrégat recyclé a montré qu'il était plus vulnérable aux attaques acides et sulfates par rapport à un béton classique, en raison de sa plus grande porosité. Cependant, après avoir été traité avec les cendres de balle de riz noirs (BRHA), des cendres de combustible d'huile de palme (POFA) et de la poudre de clinker d'huile de palme (POCP) la détérioration du béton sous l'effet de l'acide chlorhydrique (HCl) et du sulfate de magnésium (MgSO_4) a diminué d'environ 30% (Alnahhal et al., 2018). Des études ont montré que l'ajout de cendre de balle de riz noirs dans les mortiers de ciment peut améliorer la résistance à l'attaque par les sulfates de sodium, mais peuvent également altérer la résistance à l'attaque par les sulfates de magnésium (Chatveera et Lertwattanakul, 2009). Le remplacement de 20% de ciment par BRHA conduit à une réduction progressive de la corrosion du béton sous l'attaque à la fois de HCl et de H_2SO_4 . De plus, les sulfates peuvent réagir avec d'autres composés de calcium dans la matrice cimentaire, augmentant la perméabilité et facilitant la corrosion du béton (Chatveera et Lertwattanakul, 2011). Dans un test de perméabilité rapide aux chlorures, en raison de la finesse et de la vitesse de réactivité des cendres de bagasse de canne à sucre et des balles de riz (SCRHA) dans le béton, l'agro-ciment a renforcé la résistance à la pénétration des chlorures dans le béton jusqu'à une concentration de 25% de SCRHA (Kannan, 2018). Il a également été constaté que la réaction du SCRHA avec la chaux libre dans le ciment Portland produisait un gel C-S-H supplémentaire (Akkarapongtrakul et al., 2017).

I.3.2.2. Absorption d'eau

La susceptibilité du béton à la pénétration de l'eau dépend de la succion capillaire, qui affecte ses performances. Le remplacement partiel du ciment par divers pourcentages et types de cendres de déchets agricoles a montré leur efficacité dans la réduction de l'absorption d'eau du béton (Ahsan et Hossain, 2018).

Les cendres de riz non blanchi, avec un remplacement de 15% en poids, ont montré une réduction du coefficient d'absorption d'eau pour le béton à base de ces cendres par rapport au béton témoin à 0% (Ferraro et Nanni, 2012). De plus, les cendres de balles de riz (RHA) mélangées avec du métakaolin ont également été utilisées dans le béton, ce qui a montré une absorption d'eau légèrement réduite par rapport au béton sans ajout ou à base de 0% RHA, en raison de la production d'un gel de silicate de calcium hydraté (C-S-H) supplémentaire (Chatveera et Lertwattanaruk, 2009). Avec l'ajout d'un superplastifiant supplémentaire, le RHA était efficace pour réduire l'absorption d'eau du béton, même en grande quantité. L'effet micro-remplisseur et les produits C-S-H supplémentaires remplissant les pores conduisent à une réduction du volume des pores importants, et le rapport eau-liant entraîne une diminution de l'absorption d'eau dans de tels cas (Memon et al., 2011).

I.3.3. Temps de prise (temps de début et fin de prise)

Il a été observé que le temps de prise a augmenté lorsque le ciment a été partiellement remplacé par certains déchets agricoles, y compris les cendres de sciure (SDA), les cendres de bagasse de canne à sucre (SCBA), et les cendres de combustible à l'huile de palme (POFA). En effet, une augmentation de 7 et 24 minutes des temps de début et de fin de prise du ciment ont été constatés, en remplaçant le ciment par 20% de SCBA (Akkarapongtrakul et al., 2017). Les résultats dépendaient de la finesse et du taux de remplacement. Etant donné que les grosses particules de l'ajout avec une forte porosité des non brûlées ont augmenté le rapport eau-liant du béton, entraînant ainsi des temps de prise élevés.

D'autres recherches ont obtenu un comportement similaire avec des temps de prise plus longs du béton en utilisant d'autres pouzzolanes, comme les cendres volantes et les cendres de sciure. Aussi, le temps de prise dû à l'hydratation du ciment est généralement plus lent que la réaction pouzzolanique entre la pouzzolane et l'hydroxyde de calcium.

I.4. Propriétés des cendres de déchets agricoles incorporées au béton

L'utilisation des déchets agricoles dans le béton a suscité l'intérêt à la fois du monde scientifique et de l'industrie de la construction, en raison des avantages durables offerts par ces déchets, en plus de leur aspect économique et respectueux de l'environnement par rapport au ciment portland. De plus, les déchets agricoles contiennent des fibres présentant un bon équilibre rigidité-résistance, une excellente capacité d'isolation thermique, des propriétés de traction, et possèdent des caractéristiques similaires à celles des cendres de biomasse (Belhadj et al., 2016). En agriculture, c'est un déchet, mais pour l'industrie de la construction et la recherche scientifique, il présente un grand potentiel en tant qu'ajout, ce qui lui permet de réduire la consommation en énergie aussi bien pendant la construction que tout au long de la durée de vie du bâtiment. De plus, l'agro-ciment présente de bonnes qualités d'isolation thermique, ce qui résout efficacement à la fois le problème de l'élimination des déchets agricoles et l'effet thermique de la construction urbaine (Liuzzi et al., 2017; Samreen et al., 2022).

L'utilisation excessive du béton dans la construction urbaine pose des problèmes de confort thermique et d'efficacité énergétique (Wonorahardjo et al., 2019). Pour remédier à ces problèmes, l'utilisation de matériaux écologiques pourrait être une solution plus adaptée. Des

matériaux provenant de déchets agricoles tels que le chanvre, la balle de riz, la paille, la noix de coco et le lin ont été utilisés dans la construction afin d'améliorer l'isolation thermique des bâtiments (Elfordy et al., 2008). En général, les matériaux fabriqués à partir de déchets agricoles désignent la cendre de bagasse de canne à sucre, la balle de riz, le roseau géant sauvage (canne), la sciure, la coque d'arachide, les déchets de tabac, la cendre de combustible d'huile de palme, la coque de noix de coco, etc (Gunasekaran et al., 2013). Ces matériaux ont tous en commun la caractéristique d'être utilisés comme des cendres apportant une propriété pouzzolanique supplémentaire dans les matériaux de construction (Prusty et al., 2016). Il est important de noter qu'au cours de la combustion, jusqu'à 95% des substances présentes dans les déchets agricoles se transforment en silice amorphe (Gursel et al., 2016). Les avantages supplémentaires des matériaux provenant de déchets agricoles sont liés à une amélioration de la durabilité de la structure résultante et à une diminution de la perméabilité de la matrice de ciment après une exposition à une attaque acide (Chatveera et Lertwattanak, 2011).

En particulier, en Asie et en Amérique latine, les recherches dans le domaine agro-industriel ont ouvert une nouvelle catégorie de déchets, les pouzzolanes, qui sont considérées comme une source inépuisable de solutions alternatives (Gunasekaran et al., 2013). Ces déchets agricoles ne s'accumulent pas dans les décharges et peuvent présenter divers problèmes environnementaux, technologiques et sociaux en raison de leur élimination non contrôlée. Cependant, une fois activés dans la plage de 600 à 800°C, selon leur composition chimique et physique, ces déchets agricoles peuvent atteindre d'excellentes performances en tant qu'ajout cimentaires afin d'améliorer les performances des mortiers et des bétons (Ferrándiz-Mas et al., 2014). Les cendres de déchets agricoles contiennent principalement du SiO₂, CaO, Al₂O₃ et Fe₂O₃ (Tableau I.2), qui sont des composants étroitement liés au ciment portland (He et al., 2020). Les composants des cendres de déchets agricoles et leur corrélation avec le ciment en font une alternative parfaite aux matériaux cimentaires (Viruthagiri et al., 2015).

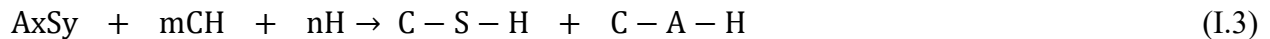
Tableau I.2: Compositions chimiques de divers agro-cendres (en %) sélectionnées dans la littérature (Thomas et al., 2021)

| Type | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | CaO | MgO | SO ₃ | K ₂ O | Na ₂ O | TiO ₂ | P ₂ O ₅ | LOI | Reference |
|-----------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------|------|-----------------|------------------|-------------------|------------------|-------------------------------|-------|-------------------------------|
| BLA | 78.71 | 1.01 | 0.54 | 7.82 | 1.83 | 1.0 | 3.78 | 0.05 | 0.08 | 0.99 | 3.83 | [35] |
| CCA | 66.38 | 7.48 | 4.44 | 11.57 | 2.06 | 1.07 | 4.92 | 0.41 | - | - | - | Adesanya and Raheem, (2009a) |
| DPA | 35.93 | 0.65 | 0.78 | 13.04 | 6.36 | - | 7.40 | 3.60 | - | - | 8.41 | [50] |
| EGA | 49.90 | 0.47 | 0.83 | 10.4 | 4.22 | 0.47 | 8.60 | - | - | 9.91 | 14.60 | [53] |
| OWA (BFA) | 11.70 | 2.51 | 1.26 | 10.20 | 3.03 | 3.60 | 42.66 | - | 0.11 | 2.97 | 18.54 | Pérez-Villarejo et al. (2020) |
| PLA | 48.70 | 2.6 | 1.4 | - | - | - | - | 0.21 | - | - | 5.06 | [58] |
| WSA | 86.5 | 0.28 | 1.13 | 9.73 | 0.78 | - | 1.54 | 0.1 | - | - | 1.2 | Ataie and Riding, (2016) |
| RSA | 79.82 | 1.13 | 0.245 | 0.370 | 7.54 | - | 1.07 | 0.501 | - | 3.75 | - | Pandey and Kumar, (2019a) |

1 **BLA**-Cendre de feuilles de bambou. 2 **CCA**-Cendres d'épi de maïs. 3 **DPA**-Cendres de palmier dattier. 4 **EGA**-Cendre d'herbe à éléphant. 5 **OWA**-Cendres de déchets d'olives. 6 **PLA**-Cendres de feuilles de bananier. 7 **WSA** - Cendres de pailles de blé. 8 **RSA**-Cendres de pailles de riz.

I.5. Effet des agro-ciments sur la matrice cimentaire

Les déchets agricoles utilisés comme agro-ciment possèdent une propriété pouzzolanique qui contribue à améliorer les propriétés mécaniques du béton (He et al., 2020). Les matériaux pouzzolaniques sont utilisés comme substitut au ciment dans la production de béton. Elles sont généralement composées de silice ou de silice et d'alumine et n'ont pas de propriétés cimentaires en soi. Cependant, une fois finement broyées et en présence d'eau, elles réagissent chimiquement avec l'hydroxyde de calcium à température ambiante pour former des composés avec des propriétés cimentaires. La lignine et la cellulose présentes dans l'agro-ciment peuvent se transformer en silice et provoquer des réactions pouzzolaniques, qui se présente généralement sous la forme (équation I.3) suivante (Nwankwo et al., 2020).



Pouzzolane + hydroxyde de calcium + eau \rightarrow silicate de calcium hydraté + aluminat de calcium hydraté

Lorsque l'agro-ciment est mélangé avec du ciment portland, il réagit avec la chaux et réduit la quantité de chaux requise; cependant, il augmente la quantité de gel C-S-H, résultant en une structure plus dense de la matrice cimentaire (Arel et Aydin, 2018). Les hydrates formés de la réaction pouzzolanique comblent les espaces poreux dans le béton, ce qui conduit à l'augmentation des propriétés mécaniques et de la durabilité du mélange (Nwankwo et al., 2020). L'agro-ciment pourrait donner naissance à un nombre croissant de sites de nucléation dans la matrice cimentaire et provoquer une formation supplémentaire de gel C-S-H. Cela aide à produire des liaisons solides à l'intérieur de la matrice, augmentant ainsi la résistance à la compression du béton (Figure I.7).

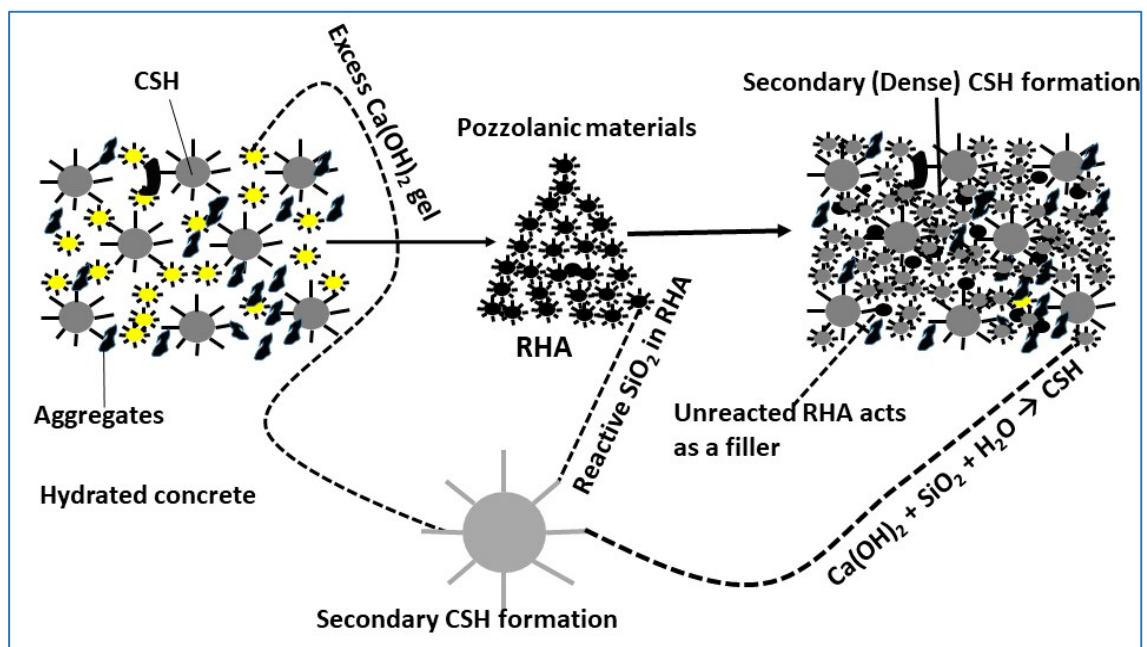


Figure I.7: Processus d'hydratation du ciment à base des cendres de balles de riz (RHA) (Raghav et al., 2021)

Le remplacement partiel du ciment par l'agro-ciment permet une augmentation lente mais à long terme de la durabilité du béton, grâce à la réaction pouzzolanique. De plus, la nature mésoporeuse des particules d'agro-ciment entraîne une réduction du rapport eau-liant efficace dans la matrice cimentaire, ce qui améliore finalement la résistance à la compression du béton (Van et al., 2014). En raison de sa forte teneur en silice, l'agro-ciment améliore la capacité de la matrice cimentaire à réagir avec les molécules d'eau pour produire du $\text{Ca}(\text{OH})_2$, ce qui peut améliorer la résistance du béton (Blesson et Rao, 2023). En outre, un autre élément résultant de la même réaction, l'hydrate de silicate de calcium ($3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$), qui se forme autour des particules de sable, a un impact sur la répartition de la taille des pores matriciels (Arel et Aydin, 2018). La présence de particules fines de SiO_2 dans l'agro-ciment améliore la porosité du béton, car ces particules se distribuent de manière homogène dans la matrice ciment-agrégat (Prithika et Sekar, 2016). Les agro-ciments ont été utilisés comme des ajouts cimentaires généralement à des niveaux de remplacement inférieur à 20%. Des proportions croissantes de ces ajouts dans le béton compromettent sa résistance à la compression, bien que cela puisse être amélioré par des moyens mécaniques et chimiques (Liew et al., 2017; Blesson et Rao, 2023).

I.6. Les cendres de déchets agricoles les plus utilisées comme agro-ciment

I.6.1. Cendres de balles de riz (RHA)

Les cendres de balles de riz (RHA) sont produites par le processus de combustion de balles de riz brutes issues de l'industrie agroalimentaire à des températures de 600 à 800 °C dans un incinérateur (Figure I.8 (a et b)). Après la combustion, les cendres obtenues sont refroidies et peuvent varier en couleur du blanc gris au noir, en fonction de la source de la matière première, de la méthode d'incinération, du temps et de la température de combustion. Le RHA est caractérisé par des particules très fines, avec une taille moyenne variant de 5 à 10 μm , et contient généralement entre 85 et 90 % de silice amorphe. Toutefois, il doit répondre aux exigences de la composition chimique des pouzzolanes utilisées dans le ciment et le béton, telles que spécifiées dans l'ASTM C618.

La résistance à la compression des bétons à base de RHA est supérieure à celle du béton ordinaire à divers âges et jusqu'à 90 jours. Les effets chimiques et physiques du RHA améliorent les propriétés mécaniques et de durabilité du béton. Le RHA modifie la taille des pores, en réduisant les grands pores et en transformant les pores continus en pores discontinus. Cela a pour conséquence de rendre la microstructure de la pâte plus uniforme et compacte. Les performances du béton contenant du RHA en remplacement partiel du ciment sont remarquables, notamment en termes de résistance à l'eau et à la pénétration des ions chlorures, des caractéristiques essentielles pour la durabilité et la prévention de la corrosion dans de nombreux cas (Jamil et al., 2016).



Figure I.8: (a) Balles de riz ; (b) Cendres des balles de riz (RHA)
(Villar-Cociña et al., 2011)

I.6.2. Cendres de palmier à huile (POFA)

Les cendres de palmier à huile (POFA) illustrées sur la Figure I.9 (a et b) proviennent de la combustion de résidus de palmier à huile comme les fibres et les coques de palmier (Figure I.10), originaire des pays tropicaux tels que la Malaisie, l'Indonésie, la Thaïlande, l'Afrique et l'Amérique latine. Ces résidus sont brûlés à des températures de 800 à 1000 °C dans un four pour produire de la vapeur utilisée dans la production d'électricité par les centrales thermiques à biomasse. Environ 15% des résidus sont des coques et 85% des fibres. Les grappes de fruits vides sont brûlées dans une chaudière pour produire de l'énergie. La cendre fine est capturée avant de s'échapper de la chaudière, puis tamisée à travers un filtre de 150 à 300 μm pour éliminer les particules de cendres plus grosses et les matériaux non brûlés. En moyenne, environ 5% du poids des déchets solides se retrouvent sous forme de cendres. Ces cendres, qui sont rarement utilisées, se transforment en un déchet sous forme de cendres.

Le principal oxyde du POFA est la silice (SiO_2). Il a été expliqué que le POFA est modérément riche en silice (59.6 – 66.9%) par rapport au ciment. De plus, la teneur en fer (1.9 – 5.7%) est similaire à celle de la chaux (CaO), qui est très faible, soit environ 5%. Cependant, il est beaucoup plus fin que le ciment et sa densité est d'environ 1.9 – 2.4. Par exemple, la perte au feu (PAF) détectée est de 8.25%, ce qui est légèrement supérieur à la valeur maximale de 6% stipulée dans l'ASTM C618. La différence dans la quantité des composants chimiques dans le POFA est due à la source du matériau, ainsi qu'au processus de combustion et à son efficacité (temps et température). Tous les chercheurs ont attribué les améliorations dans le comportement du béton à base de POFA à la réaction pouzzolanique qui a permis la libération des produits d'hydratation. Le POFA peut être utilisé comme un ajout cimentaire jusqu'à 30% dans la production de béton à haute résistance, compte tenu que la résistance de compression obtenue est supérieure à celle du béton fabriqué à partir de ciment portland sans ajout (Aprianti et al., 2015).

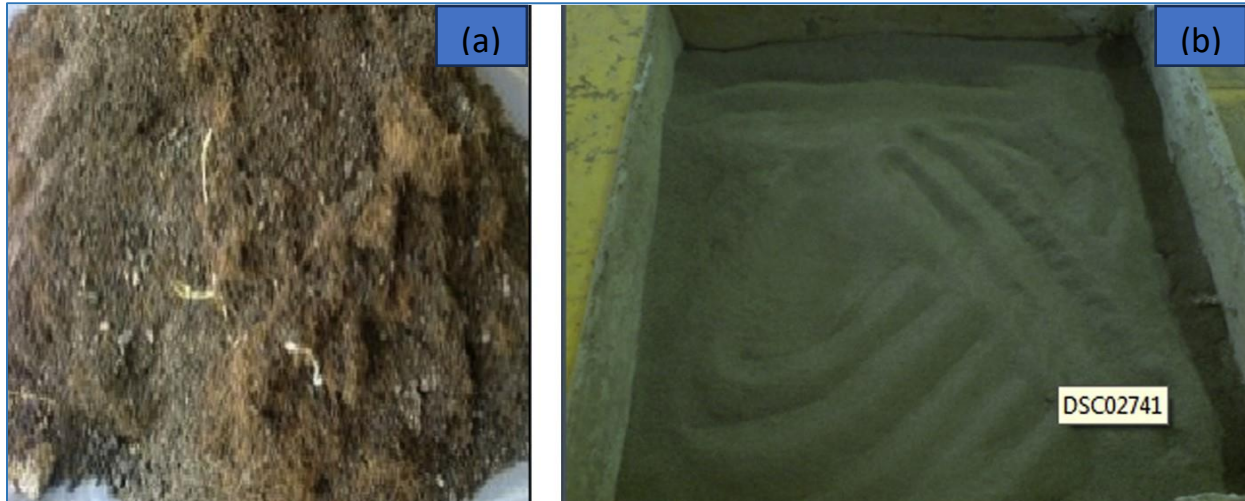


Figure I.9: (a) Déchet de palmier à huile; (b) Cendres de palmier à huile POFA (Sata et al., 2004)



(a) Une grappe de fruits vides

(b) Séchage d'un tas de grappes de fruits vides

Figure I.10: Grappes de fruits de palmier à huile vides (Fapohunda et Oluwasegunota, 2019)

I.6.3. Cendres de déchets de bois (WWA)

Les cendres de bois (Figure I.11) sont issues du processus de combustion de plusieurs produits de bois, tels que les copeaux et l'écorce. Cependant, le processus final de gestion des cendres de bois doit être soigneusement contrôlé en raison de la finesse des particules et de la facilité avec laquelle la pollution de l'air peut causer des problèmes respiratoires aux habitants vivant près du site polluant.

Des chercheurs ont étudié la résistance à la compression et à la flexion du mélange de pâte en remplaçant le ciment par des cendres WWA à des pourcentages de 0%, 10% et 40% pendant une période de 180 jours. Ils ont constaté que les résistances optimales à la compression et à la

flexion étaient obtenues pour 10% en poids de WWA. Par ailleurs, les mélanges de ciment utilisant WWA ont montré une profondeur de carbonatation plus grande que le mélange avec du ciment portland. Les cendres WWA peuvent être un matériau pouzzolanique prometteur pour le remplacement du ciment tout en contribuant à la durabilité des éco-constructions (Aprianti et al., 2015).

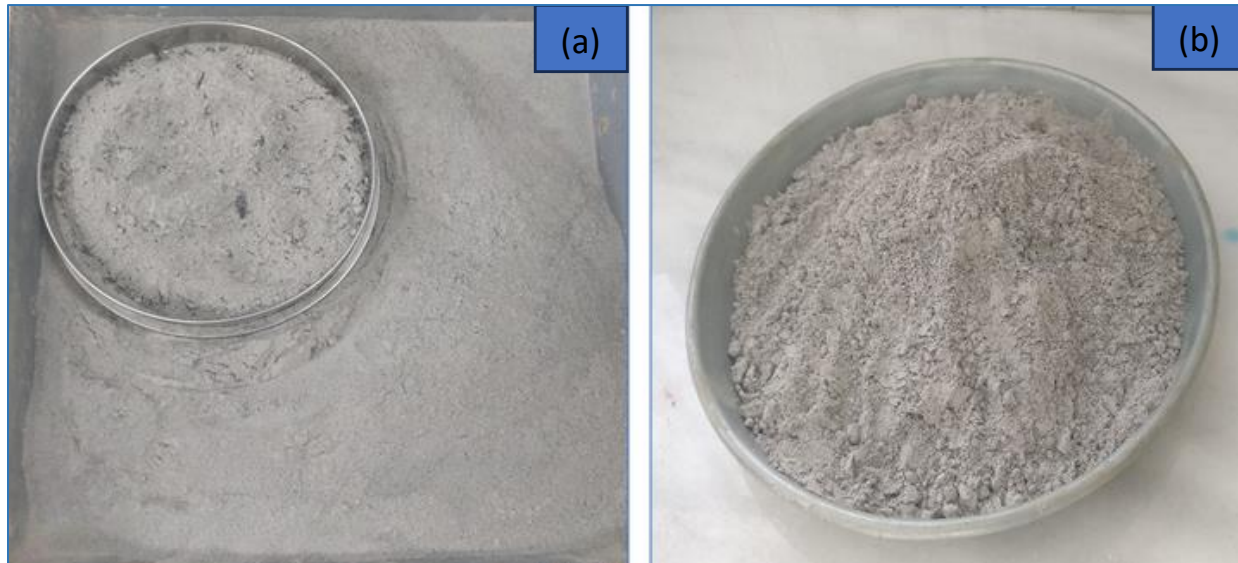


Figure I.11: (a) Cendres de bois en cours de tamisage; (b) Cendres de bois après tamisage

I.6.4. Cendres de feuilles de bambou (BLA)

Les feuilles de bambou est l'un des déchets solides issus de l'agriculture (Figure I.12 (a)). Le bambou est la ressource naturelle la plus productive et possède la croissance la plus rapide, pouvant être utilisé comme fibre et pour d'autres usages importants dans la construction. La Figure I.12 (a et b) montre les cendres de feuille de bambou après le processus de calcination à 600 °C pendant 2 heures dans un four électrique. Ce déchet agricole est relativement nouveau dans l'industrie de la construction et seules quelques études ont été menées sur l'utilisation des cendres de feuille de bambou dans un mélange de béton. Le processus d'hydratation des cendres de feuille de bambou, a été étudié en tant qu'ajout cimentaire, et la proportion optimale était de 20% en poids de BLA, ce qui est comparable au ciment portland ordinaire, comme indiqué par Aprianti et al. (2015).

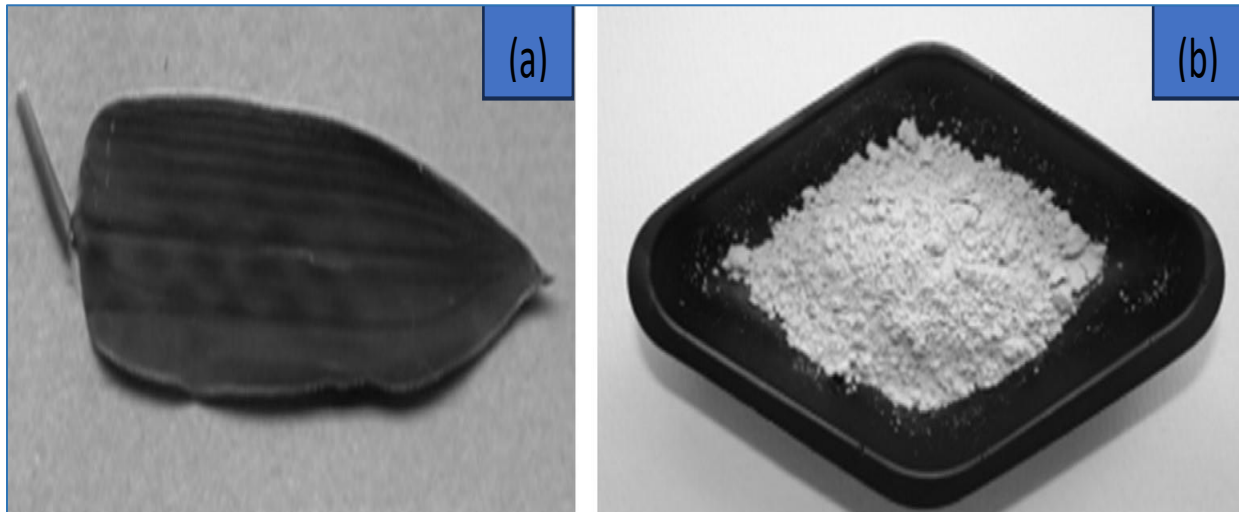


Figure I.12: (a) Feuille de bambou ; (b) Cendres de feuilles de bambou (Villar-Cociña et al., 2011)

I.6.5. Cendres d'épi de maïs (CCA)

Les cendres d'épi de maïs (CCA) illustrées sur la Figure I.13 (a et b), sont des déchets fins provenant de la combustion de l'épi et des grains de maïs. Selon des recherches, ils contiennent plus de 65% de SiO_2 et une combinaison d'oxydes d' Al_2O_3 et SiO_2 allant de 70 à 75%, ce qui leur permet d'être utilisés comme ajout cimentaire dans le béton. L'ajout des cendres CCA en tant que matériau pouzzolanique dans le ciment composite, augmente le temps de prise par rapport au béton témoin. Ce qui est avantageux lorsqu'un faible taux de chaleur d'hydratation est requis, comme pour le béton de masse (ciment à faible chaleur). Des études ont montré que la résistance à la compression du béton à base des cendres CCA était inférieure à celle du béton témoin au jeune âge. Cependant, elle s'est nettement améliorée à long terme. Et le taux optimum des cendres CCA était de 8% (Aprianti et al., 2015).

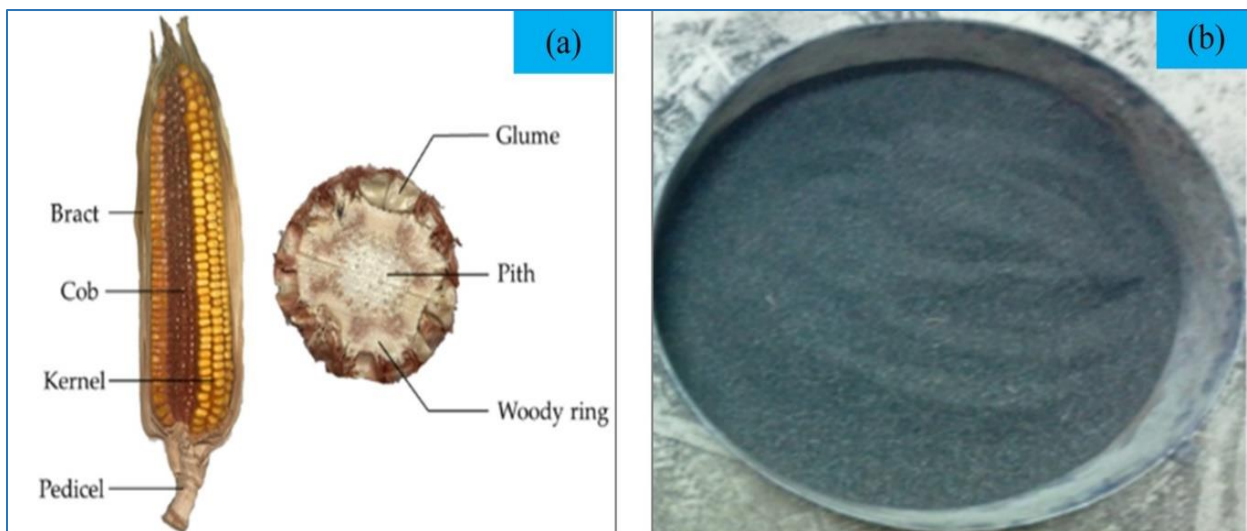


Figure I.13: (a) Epi et grains de maïs; (b) Cendres de l'épi et des grains de maïs (Bheel et al., 2021; Zou et al., 2021)

I.6.6. Cendres de palmier dattier (DPA)

Les cendres du palmier dattier (DPA) sont générées suite à la combustion des fibres et des déchets de palmiers dattiers extraites. Les palmiers dattiers (Figure I.14) sont taillés une fois par an pour un rendement plus élevé, laissant des quantités importantes de fibres et de feuilles de palmiers dattiers (Figure I.15 (a, b et c)). Les cendres DPA, utilisées comme substitut de ciment ont montré un profil élémentaire similaire à celui des cendres de bois avec une abondance d'aluminium (Al) et de fer (Fe), mais dans les limites autorisées. La composition chimique des cendres DPA est représentée dans la figure I.16 (Thomas et al., 2021).

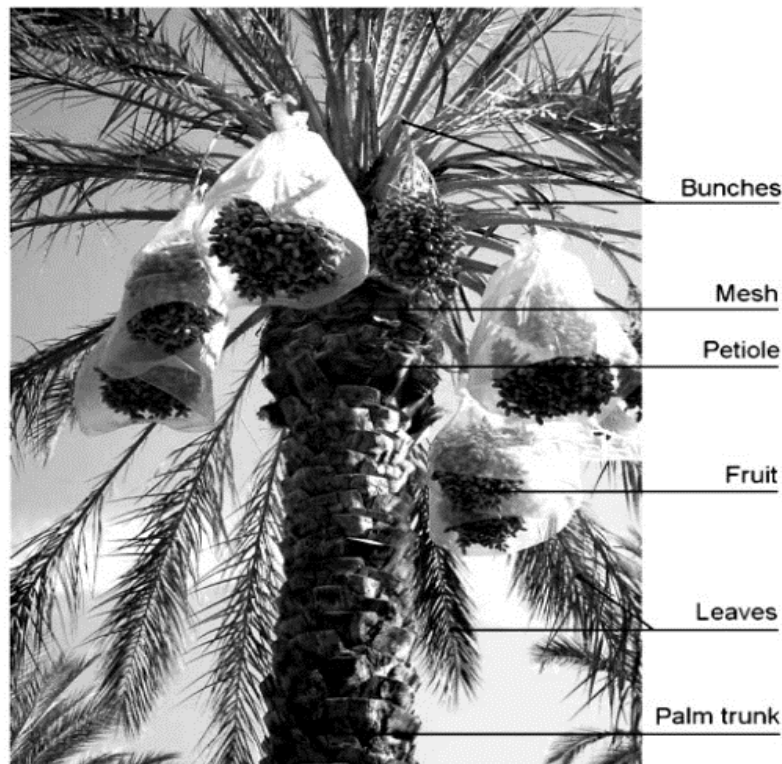


Figure I.14: Description des principales parties du palmier dattier (Agoudjil et al. 2011)

Les études ont montré que le DPA pouvait être utilisé avec des cendres volantes comme liant ternaire avec le ciment portland à un taux de remplacement maximal de 35%. L'ajout de DPA a réduit la maniabilité du mélange en raison de sa texture non uniforme et irrégulière. L'analyse thermogravimétrique (TGA) a montré que l'eau non liée dans les mélanges contenant du DPA était de 7 à 42% inférieure au mélange témoin, ce qui indique que le DPA nécessitait plus d'eau pour l'hydratation et la réaction pouzzolanique. Une autre étude sur les propriétés mécaniques des pavés contenant 4 à 12% de matériau gypseux-calcaire mélangé au DPA, a rapporté que les mélanges contenant 8% de DPA amélioreraient considérablement l'indice de portance et la résistance à la compression. Tandis que les niveaux de remplacement de 2% et 8% de DPA, ont montré des forces de liaison plus élevées et une meilleure résistance aux environnements acides. De plus, les mélanges contenant 10% de DPA ont montré des taux d'absorption d'eau initiaux et secondaires inférieurs de 35% et 20,5%, respectivement, et une rapide perméabilité aux chlorures inférieure de 19% par rapport au mélange témoin.



Figure I.15: (a) Déchets de palmiers dattiers posés au sol au Tafilalet; (b) Déchets des palmiers dattiers aux abords d’une ferme; (c) Incinération des résidus (Khardi et al., 2024)

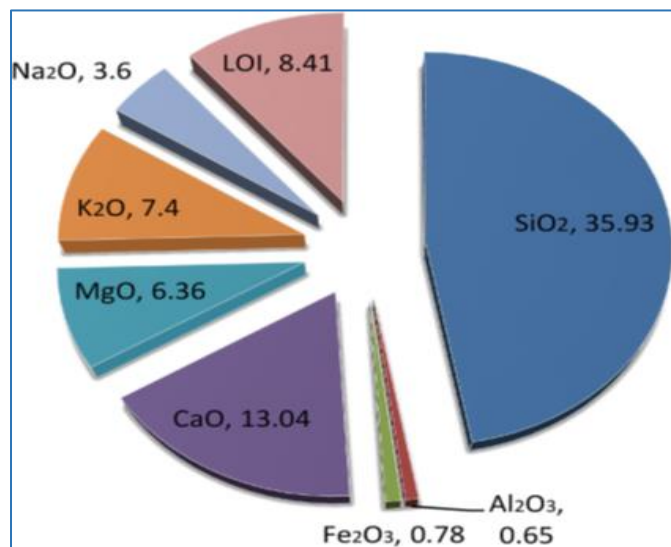


Figure I.16: Composition chimique des cendres du palmier dattier (DPA) à partir de publications sélectionnées (Thomas et al., 2021)

I.6.7. Cendres de déchets d'olives (OWA)

Thomas et al., (2021) ont rapporté que chaque année, les cultures d'oliviers produisent une quantité significative de biomasse, environ 2-3 tonnes de résidus par hectare d'oliviers, dont la plupart sont brûlés ou laissés sur le sol (Blesson et Rao, 2023). Il a été estimé que la production de 1000kg d'huile d'olive génère 1500 à 4000 kg de déchets solides. Selon la littérature, en incinérant environ 250 kg de déchets d'olives dans un four à 800 °C pendant 8 heures, on obtient environ 30 kg de cendres de déchets d'olive OWA, qui étaient ensuite broyées finement pendant 3 heures. Les cendres obtenues étaient de couleur grise (Figure I.17 (a et b)) et plus fines que le ciment portland de type 1 (la finesse de Blaine de l'OWA était de 410 m²/kg). Les particules OWA étaient principalement de forme irrégulière et en partie arrondie, et leur masse volumique et leur taille moyenne étaient respectivement de 2.13 et 10 µm.

L'OWA a été reconnue comme un ajout cimentaire potentiel dans la production de béton durable. En augmentant la teneur d'OWA dans le béton, son ouvrabilité a diminué. Cependant, en remplaçant 30% du ciment par de l'OWA, une meilleure ouvrabilité a été obtenue. Cependant, la demande en eau accrue pourrait être attribuée aux particules d'OWA très poreuses et de forme irrégulière, ainsi qu'à une teneur en aluminium plus élevée accélérant le processus d'hydratation. L'ajout de cendres de déchets d'olive OWA peut renforcer la résistance au feu du béton, et les meilleures performances au feu ont été observées lorsque la teneur en OWA est passée de 7% à 22%.

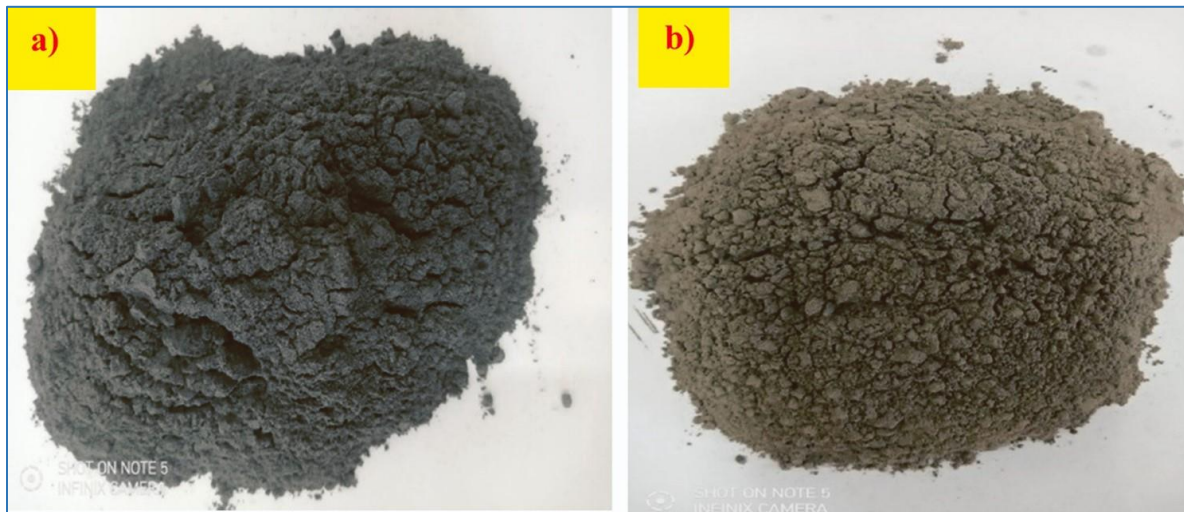


Figure I.17: (a) Cendres de balle de riz ; (b) Cendres de déchets d'olives (Hakeem et al., 2022)

I.6.8. Cendres de pailles de blé (WSA)

Les déchets de paille de blé sont générés lors de l'extraction des graines de blé des céréales. Souvent brûlés à ciel ouvert, cette paille peut causer une pollution environnementale. La combustion de la paille de blé produit des cendres de paille de blé (WSA) possédant des propriétés pouzzolaniques élevées et une teneur en silice de 73% lorsqu'ils sont conditionnés à 670 °C (par rapport à 570 °C), ce qui en fait un composant potentiel pour les matériaux cimentaires (Figure I.18 (a-d)). Chaque kilogramme de grain de blé produit en moyenne 1.3 à 1.4

kg de paille de blé, dont la combustion génère 8.6% de cendres de paille de blé (WSA). La température de combustion appropriée pour convertir la paille de blé en cendres pouzzolaniques pourrait être établie entre 570 °C et 670 °C (pendant 5 heures) (Thomas et al., 2021).

Biricik et al., (2000) ont montré que les performances du béton contenant 24% de WSA étaient avantageuses dans les environnements de sulfate de sodium, tandis que le béton contenant 8% de WSA présentait une performance améliorée dans les environnements de sulfate de magnésium. Selon Qudoos et al., (2018), les résistances à la compression ont été améliorées dans le mortier contenant des particules de WSA plus fines jusqu'à 20% de remplacement du ciment portland, et le changement de résistance était supérieur à 20%. Aussi, les investigations microscopiques ont montré que l'effet filler associé à l'effet pouzzolanique des particules de WSA plus fines densifiaient la microstructure en raison du raffinement des pores. Khushnood et al., (2014) ont observé que l'incorporation de WSA réduisait l'absorption d'eau et augmentait la résistance aux attaques acides et aux sulfates. Une résistance accrue aux dommages dus au gel/dégel a également été observée avec une augmentation de la teneur en cendres WSA, devenant plus marquée lorsque le diamètre des barres d'armature avait augmenté. Il a également été constaté que le taux de corrosion de l'acier incorporé dans le béton contenant du WSA était réduit en raison d'une possible amélioration de la stabilité du film passif.



Figure I.18: (a) Paille de blé avant combustion; (b) Cendres de paille de blé (WSA) à 550 °C; (c) WSA à 650 °C ; (d) WSA à 750 °C (Amin et al., 2019)

I.6.9. Cendres de bagasse de canne à sucre (SBCA)

Les cendres de bagasse de canne à sucre (SBCA) est un sous-produit généré à partir du processus de cogénération et de combustion à certaines températures de bagasse de canne à sucre (Figure I.19). De grandes quantités de cendres de bagasse sont produites chaque année dans les pays en développement, comme l'Inde, la Thaïlande, le Brésil, le Pakistan, la Colombie, les Philippines, l'Indonésie et la Malaisie, et sont destinées à être détruites et éliminées dans l'environnement. L'utilisation de cendres de bagasse dans le béton réduirait les émissions de CO₂ à l'échelle mondiale et augmenterait la valeur marchande des matériaux de rebut, en raison de leurs propriétés pouzzolaniques leur permettant d'être utilisées favorablement comme ajout cimentaire au ciment portland, que ce soit dans le mortier ou dans le béton (Agwa et al., 2022).

De plus, les cendres de bagasse de canne à sucre produites avec une calcination à l'air à 600 °C et un taux de chauffage de 10 °C/min présentent de la silice amorphe, une grande surface et une faible teneur en carbone. La perte au feu des cendres SBCA est supérieure à 10% en fonction du processus de cogénération et de la teneur en carbone qu'elles renferment. Des études ont révélé que les cendres de bagasse contiennent 63-70% de silice (Neto et al., 2021). Cependant, quelques études récentes ont également indiqué que les cendres de bagasse contiennent plus de 76 à 80% de SiO₂ (Torres et al., 2021), ainsi que d'autres oxydes, à savoir Al₂O₃ et Fe₂O₃ qui dénote que les cendres SBCA ont des propriétés pouzzolaniques.



Figure I.19: Processus de transformation de SCBA (Embong et al., 2016)

Bahurudeen and Santhanam (2015) ont indiqué que les cendres de bagasse obtenues ne peuvent pas être directement utilisées, car elles nécessitent un broyage et un traitement thermique pour améliorer leur finesse et éliminer les impuretés (Figure I.20). Néanmoins, certaines études récentes ont rapporté que les cendres de bagasse ne nécessitent aucun traitement thermique. Parfois, un broyage peut être recommandé pour améliorer la finesse (Xu et al., 2018).

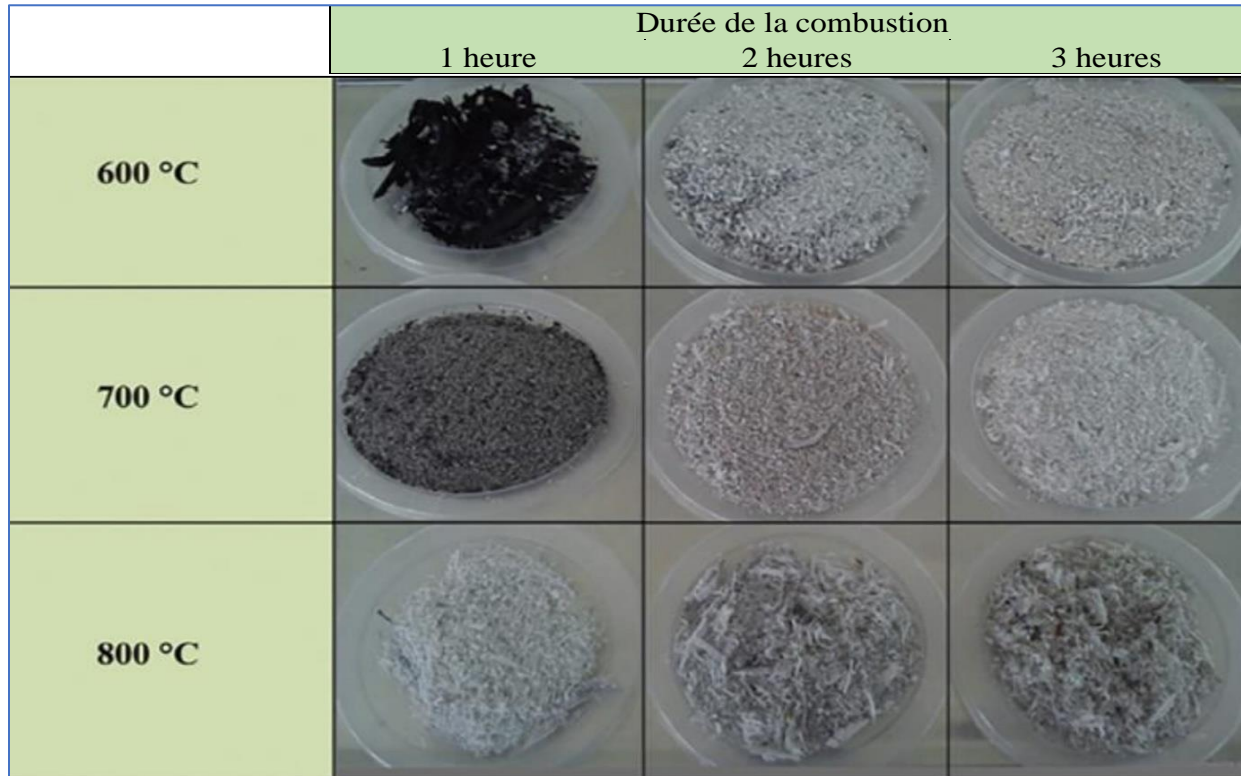


Figure I.20: Variation de l'apparence des cendres SCBA en fonction de la durée et des températures de calcination (Embong et al., 2016)

Les performances du béton à base des cendres de canne à sucre (SBCA) sont les suivantes:

- Amélioration de la résistance à la compression, à la traction par fendage, à l'absorption d'eau, à la corrosion sans affecter d'autres propriétés (le taux 15% est l'optimum),
- Les SBCA améliorent la maniabilité, la consistance, et le temps de prise des matériaux,
- Les SBCA réduisent la perméabilité à l'eau et aux chlorures dans le béton, avec des niveaux de remplacement optimaux de 20 à 25%. Toutefois, la teneur en SBCA n'ayant pas réagi dans le béton augmente la porosité et la pénétration des chlorures,
- Le béton à base d'ajout SBCA réduit l'attaque aux sulfates par rapport au béton témoin,
- Le taux optimal de remplacement du ciment est de 10% de SBCA pour une résistance et une durabilité améliorée y compris face aux acides,
- Les ciments contenant des SBCA peuvent également présenter des performances globales, telles que la résistance à l'abrasion.

La Figure I.21 montre l'effet des cendres de bagasse de canne à sucre sur l'indice de conductivité des chlorures du béton et la Figure I.22 présente les micrographies des cendres de canne examinés par le MEB.

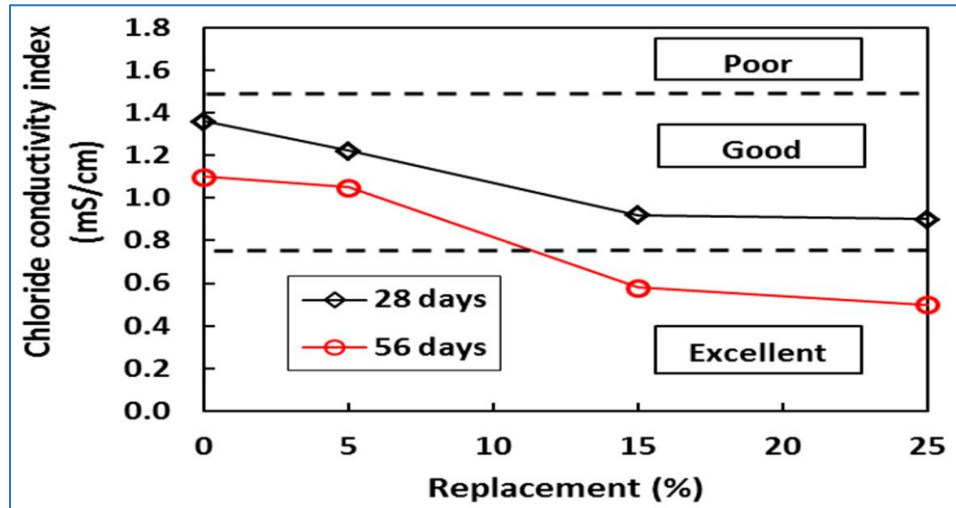


Figure I.21: Effet des cendres de bagasse de canne à sucre sur l'indice de conductivité des chlorures du béton (Bahurudeen et al., 2015)

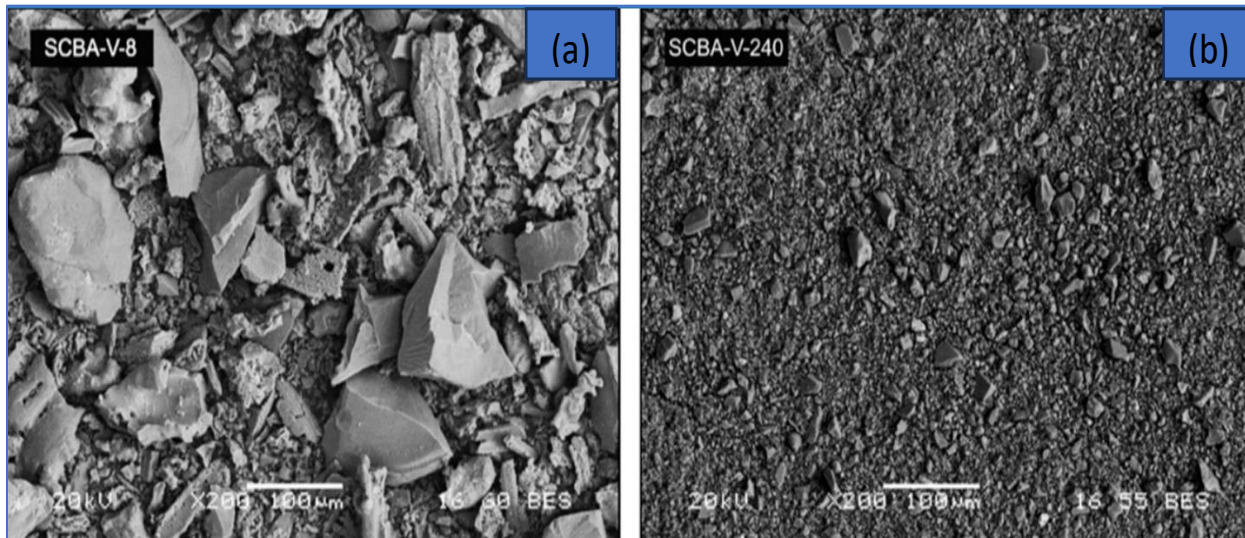


Figure I.22: Images MEB des cendres de canne à sucre (SCBA) réalisées après 8 min (a) et 240 min; (b) de broyage vibratoire (Cordeiro et al., 2008)

I.7. Cendres de canne (CA)

Les cendres de canne (CA) résultent des déchets de canne non traités de la région de Skikda, située dans le Nord-Est de l'Algérie, et sont produites par la combustion à ciel ouvert de toutes les parties de la plante (tiges et feuilles) par les agriculteurs lors du nettoyage de leur champ à une température non contrôlée (Figure I.23 (a-b)). Cette plante est largement répandue dans les pays méditerranéens, aux USA du Maryland à la Californie, en Amérique du sud, en Caraïbes, les îles du Pacifique, en Australie, en Inde, en Chine, en Iran, en Turquie, et en Afrique entre autres couvrant de vastes zones avec une capacité de régénération rapide qui explique sa disponibilité (Payá et al., 2018). Les tiges de canne sont creuses, rigides et ligneuses d'un

diamètre d'environ un pouce, pouvant atteindre plus de 13 pieds de hauteur comme illustré dans la Figure I.23 (a).

La composition chimique des cendres CA varie en fonction de leur provenance, montrant qu'elles sont principalement composées de silice, un élément essentiel pour une réaction pouzzolanique avec la présence d'alumine, d'oxyde de fer, de chaux, et d'oxyde de magnésium, et des traces d'autres éléments comme les alcalins (Na_2O et K_2O). Ces éléments représentent 75.44% du matériau. La silice constitue une proportion importante, avec plus de 51.4%, soit près de deux fois plus que le ciment, comme confirmé par Channa et al., (2022). Les particules de ces cendres ont des dimensions comprises entre 30 μm et 200 μm , ce qui est cohérent avec la taille de la plupart des cendres de déchets agricoles (Charitha et al., 2021). Les caractéristiques physico-chimiques et morphologiques des cendres CA sont examinées en détail dans le chapitre II (Caractérisation des matériaux utilisés).

Les cendres de canne possèdent des propriétés pouzzolaniques et une composition chimique en corrélation avec le ciment, ce qui suggère un potentiel de leur valorisation comme ajout cimentaire dans le béton de sable. Ainsi, nous allons discuter de la valorisation des déchets de canne et des opportunités qu'ils offrent dans le domaine des matériaux de construction.

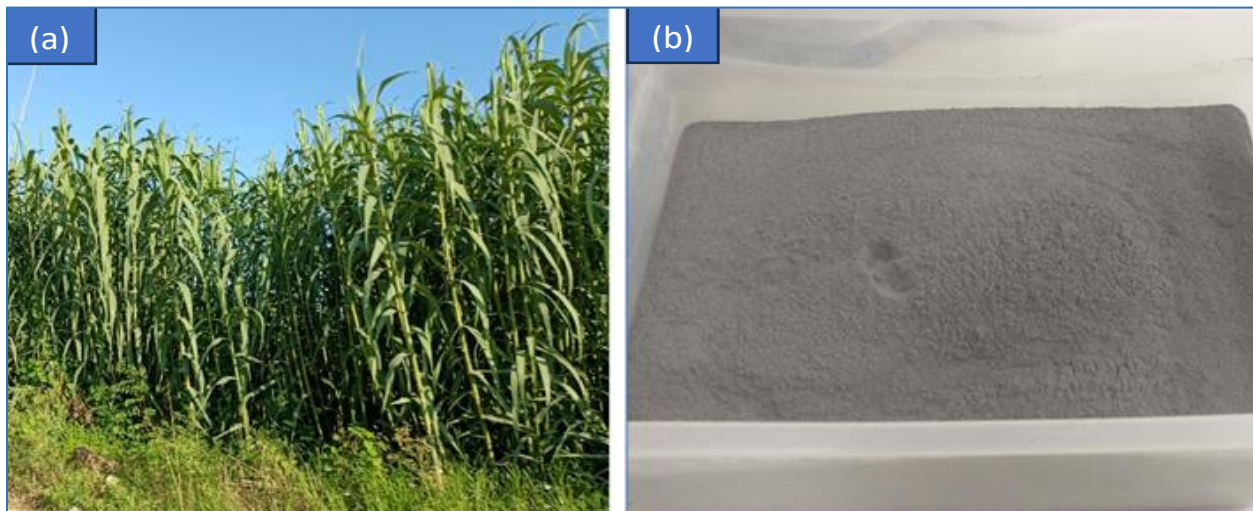


Figure I.23: (a) Canne de Skikda/Algérie; (b) Cendres de canne de Skikda

I.7.1. Effet des déchets de canne utilisés comme agro-ciment sur l'environnement

La canne a une capacité importante de se propager rapidement sur de vastes étendues géographiques via les cours d'eau naturels, permettant ainsi de conquérir rapidement de grandes zones. Cela constitue une menace sérieuse pour les zones riveraines en raison de la formation des massifs de canne qui augmentent un risque d'incendie. De plus, ces plantes modifient la forme des cours d'eau en retenant les sédiments et en restreignant les écoulements, ce qui peut entraver la navigation du ruisseau, la rendant ainsi extrêmement indésirable (Ismail et Jaeel, 2014).

Néanmoins, l'utilisation croissante des déchets agricoles comme ressources efficaces pour la fabrication d'éco-matériaux en vue d'une construction durable, est devenue une tendance

majeure dans de nombreux pays à l'échelle mondiale (Frías-Rojas et al., 2017; Magar, 2020; He et al., 2020). Cela incite à se retourner vers l'utilisation de déchets de canne comme agro-ciment dans les matériaux de construction durables pour résoudre les problèmes environnementaux, d'occupation de l'espace, et des coûts liés aux matériaux de construction.

Les chercheurs ont évalué les performances de la valorisation des déchets agricoles dans les bétons et les mortiers, selon des conditions plus respectueuses de l'environnement et économiques. Cela permettrait à la fois de pallier au manque des ressources naturelles et aux coûts associés à la valorisation de certains sous-produits industriels (Onyenokporo, 2022). De plus, cela représente une solution alternative aux problèmes environnementaux engendrés par les émissions de CO₂ lors de la production de ciment, et de la gestion des problèmes de son élimination de plus en plus coûteux (Fairbairn et al., 2010; Nwankwo et al., 2020; Shatat, 2016). Selon la littérature, la tendance future des travaux se concentrera de plus en plus sur l'utilisation des cendres agricoles, considérées comme les plus durables de tous les ajouts cimentaires. En effet, le CO₂ émis lors de leur calcination est compensé par le CO₂ absorbé pendant le cycle de vie de la plante (Onyenokporo, 2022). La conversion des déchets agricoles en matériaux cimentaires impliquera une consommation d'énergie moindre que celle requise pour la fabrication du ciment traditionnel (Fadele et Otieno, 2022). Les études dans ce domaine ont progressivement augmenté au cours des dernières décennies (Wuni et al., 2019; Mo et al., 2016) et nécessitent davantage de recherches sur la durabilité à long terme des mortiers et des bétons à base d'agro-ciments. Cela permettrait de valoriser les déchets de canne dans une perspective de développement durable, en tenant compte de la croissance de la population, de l'expansion de l'urbanisation et de l'amélioration du niveau de vie grâce aux avancées technologiques, étant donné que les résidus agricoles possèdent des caractéristiques hygrothermiques naturelles.

I.7.2. Processus de valorisation des cendres de canne comme ajout cimentaire

L'utilisation des cendres dans la fabrication de matériaux de construction représente une opportunité majeure de valorisation, notamment comme composant dans les ciments et les bétons, en raison de leur effet pouzzolanique et activateur chimique. Ainsi, la valorisation des cendres de canne comme ajout cimentaire dans la présente étude repose sur les étapes suivantes:

Les cendres de canne sont générées par la combustion des déchets de canne à l'air libre par les agriculteurs. Les cendres brutes sont recueillies sous forme de poudre de couleur gris foncé, ensuite séchées dans une étuve à 105 °C pendant 24 heures pour atteindre une masse constante. Ensuite, elles sont tamisées à travers un tamis de 400 µm afin d'éliminer les impuretés et les particules non-brûlées, de manière à les utiliser comme ajout cimentaire pour la production d'un éco-matériau durable, le béton de sable. Les cendres de canne produites sont illustrées sur la Figure I.17.

Ainsi, se poursuit le processus de valorisation des cendres de canne suivant:

- Les cendres de canne tamisées sont mélangées avec le ciment dans des proportions spécifiques pour produire des ciments composés.
- La caractérisation physique, chimique, et morphologique des cendres de canne brutes,
- Les propriétés des bétons à base de cendres CA à l'état frais (ouvrabilité, etc),

- Les propriétés des bétons à base de cendres CA à l'état durci (propriétés mécaniques, etc),
- Les propriétés des bétons à base de cendres CA sur les paramètres de durabilité,
- Les propriétés des bétons à base de cendres CA sur la microstructure.

L'avantage dans ce processus, réside dans la valorisation de ce déchet agricole en tant qu'ajout cimentaire au ciment CEMI, « simplement tel que collecté » par « combustion et tamisage » sans avoir recours à des procédés de post-traitement comme c'est le cas pour d'autres matériaux tels que les cendres de canne à sucre (SCBA). Ces dernières nécessitent un lavage avec de l'eau distillée afin d'éliminer les alcalins adsorbés et solubles comme le sucre, qui peut inhiber l'hydratation avant d'être soumis au processus d'incinération et être mélangé au ciment (Bahurudeen et Santhanam, 2015). En vue de garantir leur compatibilité avec le ciment et d'optimiser leurs propriétés.

De plus, Fadele et Otieno (2022) ont rapporté qu'une étude menée par Feng et al., (2004) a démontré que le prétraitement chimique avant la calcination permet de réduire les oxydes mineurs, diminuant ainsi leur effet sur les caractéristiques chimiques et minéralogiques. Rithuparna et al., (2021) ont souligné l'importance d'évaluer le coût de ce prétraitement par rapport à l'amélioration des propriétés des matériaux et des performances des systèmes cimentaires. Etant donné que le post-traitement des cendres est très énergivore et génère des émissions de polluants supplémentaires dans l'atmosphère. Les différentes méthodes de valorisation et de calcination (température, moyens et durée de combustion) entraînent des variations dans les caractéristiques des cendres obtenues.

L'utilisation des cendres de canne CA tel que collecté, vise à évaluer l'effet de la température de calcination sur l'activité pouzzolanique, qui n'est pas disponible dans la littérature existante (Bahurudeen et Santhanam, 2015). En outre, Xu et al., (2018) ont indiqué que pour des applications spécifiques, il convient d'étudier avec soin les méthodes de traitement des cendres afin d'obtenir une activité pouzzolanique maximale, pour un traitement plus simple et une consommation d'énergie plus faible.

I.7.3. Effets positifs de l'emploi des cendres de canne comme ajout cimentaire

L'utilisation des cendres de canne comme ajout cimentaire dans les matériaux de construction présente des avantages techniques, économiques et écologiques, cités ci-après.

I.7.3.1. Avantages techniques

- Les cendres de canne, tout comme les cendres d'autres déchets agricoles, ont montré posséder des propriétés pouzzolaniques,
- L'ajout des cendres de canne dans les matériaux cimentaires permet d'améliorer considérablement les propriétés du béton jusqu'à un niveau de remplacement optimal, tels que: l'ouvrabilité, les propriétés mécaniques et la durabilité à long terme,
- L'ajout des cendres CA dans la matrice cimentaire peut modifier la nature et la texture des hydrates formés,
- L'emploi des cendres de canne comme ajout cimentaire permet de produire de nouveaux éco-matériaux.

I.7.3.2. Avantages économiques

- La réduction des coûts de production de ciment, un matériau énergivore, et son remplacement par l'ajout cimentaire permettent de diminuer les coûts liés à la construction et à la gestion des problèmes environnementaux,
- La conversion des déchets agricoles en matériaux cimentaires nécessitera moins d'énergie que la production du ciment ordinaire, ce qui aura un impact positif sur les coûts de production,
- Remédier à la fois aux pénuries des ressources naturelles et au processus coûteux liés à la valorisation de certains sous-produits industriels,
- L'emploi des cendres de canne comme ajout cimentaire dans les matériaux de construction, ouvre des perspectives pour la fabrication des matériaux spécifiques sur de vastes marchés,
- Les cendres de canne, une ressource locale disponible et pouvant se régénérer rapidement, sont une matière première à moindre coût.

I.7.3.3. Avantages écologiques et environnementaux

- Protéger l'environnement en préservant les ressources naturelles,
- Réduire les émissions de CO₂ de l'industrie cimentière et gérer efficacement les problèmes environnementaux liés à son élimination, devenus de plus en plus coûteux,
- Valoriser les déchets de canne habituellement jetés ou brûlés en agro-ciment permet de réduire les déchets agricoles, tout en améliorant leur gestion et leur élimination de manière plus efficace dans l'environnement,
- Les cendres de canne, contrairement à d'autres cendres agricoles, peuvent être utilisées directement sans traitement supplémentaire. Cela élimine le besoin de procédés de post-traitement énergivores et réduit les émissions polluantes associées au lavage et au mélange.

I.8. Travaux antérieurs

Les travaux de recherche récents se concentrent sur la quête de solutions respectueuses de l'environnement à base de déchets agricoles en remplacement des additifs cimentaires classiques, provenant de la valorisation de certains déchets industriels. Plusieurs auteurs se sont penchés sur cette problématique afin d'élargir la gamme des ajouts cimentaires déjà utilisés et normalisés, tels que les cendres volantes, certains types de laitiers, et les fumées de silice, afin de poursuivre dans cette voie prometteuse pour le domaine des éco-matériaux de construction, citant à titre non exhaustif les cendres de canne.

Cordeiro et Sales (2016), ont étudié l'influence de la température de calcination sur les propriétés pouzzolaniques des cendres d'herbe à éléphant (EGA) en tant qu'ajout cimentaire. Cinq températures de calcination différentes ont été utilisées (allant de 500 à 900 °C pendant 3 heures par incréments de 100 °C). Une diminution marquée des valeurs de la perte au feu et, par conséquent, une augmentation de la teneur en silice de l'EGA produite à des températures plus élevées a été observée. Les résultats ont démontré que la température de 600 °C était la plus adaptée pour produire les cendres EGA. De plus, le remplacement de 20% de ciment par de l'EGA calcinée à 600 °C, n'a pas eu un effet significatif sur la résistance à la compression du béton à 28 jours, mais a augmenté la résistance après 180 jours par rapport au béton de référence.

Deepika et al., (2017), ont évalué la performance des cendres de bagasse de canne à sucre (SCBA) dans les matériaux de construction tels que le béton activé par les alcalis, les blocs de pavés et les briques imbrûlées. Ils ont constaté des améliorations significatives des caractéristiques, en particulier de la résistance et de la durabilité. Les briques imbrûlées à base de SCBA ont montré une absorption d'eau plus élevée que ceux à base de cendres volants. Les blocs de pavés à base de cendres de SCBA ont montré une résistance significative à la pénétration de l'eau et la sorptivité par rapport aux témoins.

Jagadesh et al., (2018), ont étudié les propriétés mécaniques du béton à base de cendres de bagasse de canne à sucre (SCBA) en remplacement partiel de ciment portland à différentes proportions (5%, 10% jusqu'à 30%). Les résultats de l'étude ont révélé la réduction de l'impact environnemental et l'amélioration des propriétés mécaniques particulièrement à long terme telles que la résistance à la compression, la résistance à la flexion et le module d'élasticité, en affichant le niveau de remplacement optimal pour le taux de 10%. L'étude a aussi établi des relations entre la résistance à la compression, la résistance à la flexion et le MOE pour le béton à base de SCBA.

Payá et al., (2018), ont examiné la possibilité d'utiliser les cendres de la plante *Arundo donax* (canne de Provence) collectées à Valence, près de l'Université Politècnica de València, comme ajout cimentaire dans le cadre de la valorisation des cendres de biomasse. Des études en microscopie électronique sur des échantillons de différentes parties de la plante (tige, gaine et feuille) séchées et calcinées ont été menées. Les cendres d'*Arundo donax* (ADSA) présentent un potentiel en tant qu'ajout cimentaire en raison de sa teneur élevée en silice et de son excellente réactivité pouzzolanique, ce qui en fait une alternative prometteuse dans la production de béton. Cependant, sa teneur élevée en chlorure (5-13%), limite son utilisation au béton non armé en acier.

Rithuparna et al., (2021), ont analysé l'impact de diverses méthodes de traitement sur l'activité des bétons à base de cendres de déchets agricoles, i.e., les cendres de bagasse de canne à sucre (SCBA); les cendres de paille de canne (CSA); les cendres de feuilles de bambou (BLA); les cendres d'herbe à éléphant (EGA); les cendres de paille de blé (WSA) ; les cendres de balles de riz (RHA); les cendres d'épi de maïs (CCA); et les cendres de palmier à huile (POFA). Ils ont présenté différents types de bétons d'agro-ciments et leurs propriétés physiques, chimiques et minérales. L'étude a révélé que le broyage augmente l'activité pouzzolanique des bétons de plus de 75%, tandis que le traitement thermique augmente la surface spécifique et améliore les performances pouzzolaniques. La température de combustion optimale varie de 500 à 700 °C, améliorant la durabilité et la résistance des systèmes cimentaires. L'étude a conclu que la méthode de traitement influence de manière significative sur l'utilisation efficace des bétons à base de cendres de déchets agricoles.

Charitha et al., (2021), ont exploré à travers cette revue l'effet de l'utilisation de diverses cendres de déchets agricoles, y compris les cendres de bagasse de canne à sucre, les cendres de balle de riz, les cendres de combustible d'huile de palme, les cendres d'épis de maïs, les cendres de coque de noix de coco, les cendres de bois, les cendres de coque d'arachide, les cendres de pelure de manioc, les cendres de paille de blé, les cendres de tabac et les cendres de feuilles de bambou, comme matériaux cimentaires dans le béton, en présentant leurs caractéristiques

physiques, chimiques et morphologiques. L'étude révèle que les cendres de déchets agricoles ont une teneur en silice supérieure à 50%, et réduisent l'affaissement et la perméabilité, tout en améliorent la durabilité des bétons à base d'agro-ciments.

Thomas et al., (2021), ont revu les propriétés physiques et chimiques des cendres de bagasse de canne à sucre, en évaluant leurs performances en béton, leurs propriétés à l'état frais et durci et leurs paramètres de durabilité. Les résultats suggèrent une amélioration des performances, en termes de résistance à la compression jusqu'à 20% de remplacement et une perméabilité réduite grâce au raffinement des pores, une excellente résistance aux chlorures et une structure plus dense révélée par l'étude microstructurale. Cependant, une détérioration négligeable à l'attaque des sulfates, et une réduction modeste de la résistance, a été montrée.

Jittin et Bahurudeen (2021), ont évalué la performance d'un système cimentaire ternaire contenant des cendres de bagasse de canne à sucre et des cendres de balle de riz. Le béton mélangé ternaire présente une contrainte d'élasticité, une viscosité plastique et un indice de consistance accrus avec l'ajout de ces matériaux. La résistance à la compression la plus élevée est observée avec 10% de cendres de bagasse et 5% de cendres de balle de riz, suivies d'un béton binaire mélangé avec 20% de cendres de bagasse. L'ajout de cendres de bagasse et de cendres de balle de riz réduit la perméabilité au chlorure, l'indice de sorptivité et la porosité du béton à base d'ajout. Aussi, la réduction de la portlandite avec l'augmentation du dosage des cendres agricoles, a été indiquée.

Athira et Bahurudeen (2022), ont étudié l'utilisation de cendres de paille de riz et de cendres de bagasse de canne à sucre comme ajouts cimentaires dans le béton. Les deux types de cendres sont riches en phytolithes, et les cendre de paille de riz présentant les niveaux les plus élevés. Les propriétés rhéologiques du système cimentaire sont influencées par le réseau fibreux présent dans les cendres. L'ajout de ces cendres augmente la limite d'élasticité et la viscosité de la pâte de ciment. Le traitement mécanique des cendres améliore les propriétés rhéologiques du ciment mélangé à ces cendres. Le dosage optimal de superplastifiant requis est de 0.6% et 0.4%, respectivement.

Memon et al., (2022), ont examiné le comportement du béton à base de cendres de bagasse de canne à sucre traitées (SCBA). Ces derniers ont contribué à augmenter l'ouvrabilité tandis que la densité a été réduite. Aussi, une amélioration des propriétés mécaniques et de durabilité du béton a été constatée lorsqu'elles remplacent partiellement le ciment, avec un potentiel d'applications structurelles.

Toutes les études et les travaux antérieurs examinés confirment l'effet bénéfique de l'utilisation des cendres de déchets agricoles, notamment les cendres de canne comme ajout cimentaire binaire ou ternaire dans les bétons, les mortiers, les pavés, et les briques. Par conséquent, la présente étude examinera l'effet de l'ajout des cendres de canne CA provenant de la région de Skikda/Algérie à différents dosages de 0%, 8%, 16%, et 24% en remplacement du ciment CEMI dans le béton de sable.

I.9. Conclusion

Cette étude s'inscrit dans le cadre d'une initiative visant à récupérer et à valoriser des déchets agricoles, en l'occurrence les déchets de canne, auparavant jetés ou brûlés, en les intégrant comme agro-ciment dans la composition du béton de sable. Cette démarche a pour but d'atténuer les problèmes écologiques liés à l'accumulation des déchets dans l'environnement en améliorant leur gestion et leur élimination de manière plus efficace.

L'utilisation des cendres de déchets de canne comme ajout cimentaire offrira des opportunités pour la fabrication de matériaux de constructions plus respectueux de l'environnement tout en élargissant la gamme des ajouts cimentaires avec des matériaux locaux disponibles, s'inscrivant ainsi dans une perspective de développement durable.

Dans ce chapitre, une synthèse bibliographique a été présentée mettant en lumière l'importance de valoriser les déchets agricoles dans le domaine du génie civil et leur impact sur les propriétés des bétons. Les caractéristiques et l'influence en tant qu'additif cimentaire ont été également abordées.

Une analyse des cendres agricoles les plus utilisées comme ajout cimentaire a été effectuée, incluant leurs propriétés et contributions. De plus, le potentiel de valorisation des cendres de canne et les recherches antérieures menées dans ce domaine ont été exposés.

Les études menées jusqu'à présent, ont démontré l'efficacité de l'emploi des déchets de canne dans les mortiers, les bétons, les pavés et les briques, améliorant à la fois leurs caractéristiques physiques, mécaniques ainsi que leurs paramètres de durabilité.

Chapitre II

Caractérisation des matériaux utilisés

II. Caractérisation des matériaux utilisés

II.1. Introduction

Les performances d'un béton sont tributaires des caractéristiques physico-chimiques et mécaniques des éléments qui le composent. Ces derniers doivent être caractérisés au préalable selon les normes en vigueur afin d'identifier les propriétés essentielles et pertinentes qui justifient leur utilisation, en vue de sélectionner la formulation appropriée.

Dans ce chapitre, il est exposé la caractérisation des matériaux employés dans la fabrication des bétons de sable à base de cendres de canne. Des matériaux locaux ont été spécifiquement choisis pour cette étude afin d'atteindre des objectifs techniques, économiques et environnementaux. Nous avons opté pour l'utilisation du sable de dunes, abondamment disponible en Algérie. Nous avons également employé des fines calcaires, qui sont un sous-produit de l'industrie des granulats. En ce qui concerne le liant, notre choix s'est porté sur un ciment portland CEMI 42.5N. Les cendres de canne issues des déchets des champs agricoles en constante augmentation ont été utilisées comme ajout cimentaire afin d'optimiser les propriétés des bétons et contribuer à la préservation de l'environnement. De plus, un adjuvant superplastifiant a été incorporé au béton en vue d'améliorer son ouvrabilité et potentiellement renforcer ses caractéristiques mécaniques.

Les analyses chimiques et minéralogiques ont été effectuées au niveau du laboratoire de chimie de la cimenterie **Hadjar Soud (Groupe GICA)** de Skikda. Les caractéristiques physiques ont été mesurées au sein du laboratoire de génie civil de l'université de Skikda ainsi que le laboratoire national de l'habitat et de la construction **LHC-Est** de Skikda. Les caractéristiques morphologiques ont été analysées par MEB au niveau du laboratoire du centre de recherche et de développement (**CRD**) de Boumerdes de la société pétrochimique Sonatrach/Algérie.

II.2. Caractérisation des matériaux

II.2.1. Ciment

Le ciment employé pour fabriquer le béton de sable des différentes compositions objet de notre programme expérimental, est un ciment portland CEMI 42.5 N, conforme à la norme algérienne NA 442, provenant de la cimenterie SCAEK Ain El Kebira-Sétif/Algérie (Figure II.1). La composition chimique, minéralogique, ainsi que les caractéristiques physiques et mécaniques, sont présentées au Tableau II.1, Tableau II.2 et Tableau II.3, respectivement.



Figure II.1: Ciment CEMI 42.5N d'Ain El Kebira-Sétif

Tableau II.1: Composition chimique du ciment

| Elément | CaO | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | MgO | Na ₂ O | K ₂ O | Cl ⁻ | SO ₃ | CaO Libre | PAF |
|---------|-------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|------|-------------------|------------------|-----------------|-----------------|-----------|------|
| % | 65.11 | 22.77 | 4.72 | 5.66 | 1.31 | 0.05 | 0.12 | 0.004 | 0.05 | 0.5 | 0.20 |

Tableau II.2: Composition minéralogique du ciment

| Elément | C ₃ S | C ₂ S | C ₃ A | C ₄ AF |
|---------|------------------|------------------|------------------|-------------------|
| % | 50.07 | 27.53 | 2.93 | 17.21 |

Tableau II.3: Caractéristiques physiques et mécaniques du ciment

| Caractéristiques | Résultats | |
|---|-----------|---------|
| Masse volumique absolue (g/cm ³) | 3.22 | |
| Surface spécifique de Blaine SSB (cm ² /g) | 3208 | |
| Consistance normale (%) | 24.4 | |
| Début de prise (min) | 244 | |
| Fin de prise (min) | 428 | |
| | 2jours | 28jours |
| Résistance en compression (MPa) | 15.45 | 48.5 |
| Résistance en traction (MPa) | 4.13 | 7.32 |

L'analyse minéralogique du ciment CEMI, révèle une faible teneur en C₃A. Les ciments à faible teneur en C₃A, ont une grande résistance aux sulfates. De plus, la proportion de C₃S dans le CEMI est considérable, ce qui dénote des résistances élevées au jeune âge.

II.2.2. Cendres de canne

Les cendres de canne (CA) constituent une ressource locale et aisément accessible en raison de leur capacité à se renouveler rapidement. Originaires des déchets non traités de canne dans la région de Skikda, située au Nord-Est de l'Algérie, ces cendres sont obtenues par la combustion en plein air des tiges et des feuilles de la plante par les agriculteurs lors du nettoyage de leur champ, à une température incontrôlée. Les cendres brutes ainsi recueillies se présentent sous forme d'une poudre de teinte gris foncé. Après avoir été séchées dans une étuve à 105 °C pendant 24 heures jusqu'à l'obtention d'une masse constante, elles sont ensuite tamisées à travers un tamis de 400µm afin d'éliminer les impuretés et les particules imbrûlées, en vue de leur utilisation comme ajout cimentaire. Les cendres de canne ainsi produites sont représentées sur la Figure II.2.

L'avantage dans ce processus, réside dans la valorisation de ce déchet agricole comme ajout cimentaire au ciment CEMI, « simplement tel que collecté » par « combustion et tamisage », sans nécessiter un procédé de post-traitement énergivore qui pourrait entraîner le rejet de polluants supplémentaires dans l'atmosphère. Les caractéristiques chimiques et physiques des cendres de canne, sont illustrées dans le Tableau II.4 et le Tableau II.5.



Figure II.2: Transformation des déchets de canne originaires des champs de Skikda/Algérie en cendres de canne

Tableau II.4: Composition chimique des cendres de canne

| Elément | CaO | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | MgO | Na ₂ O | K ₂ O | Cl ⁻ | SO ₃ | PAF | Autres |
|---------|------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------|-------------------|------------------|-----------------|-----------------|------|--------|
| % | 7.07 | 51.42 | 1.38 | 1.15 | 14.42 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 8.99 | 15.57 |

Tableau II.5: Caractéristiques physiques des cendres de canne

| Propriétés | Résultats |
|--|-----------|
| Masse volumique apparente (g/cm ³) | 0.48 |
| Masse volumique absolue (g/cm ³) | 2.17 |
| Surface spécifique Blaine SSB (cm ² /g) | 2071 |

II.2.3. Sable

Les mélanges de béton de sable sont élaborés à partir d'un sable de dunes siliceux qui représente l'élément principal de son ossature (Figure II.3). Ce sable, provenant de la région d'Oued Zhor/Collo-Skikda/Algérie, est un sable roulé à granulométrie continue (0/1 mm). Il se caractérise par sa finesse (module de finesse de 1.52; teneur en fines de 1.022%) ainsi que par sa propreté (équivalent de sable ESP 81%). Les résultats de l'analyse chimique et des caractéristiques physiques du sable, sont présentées dans le Tableau II.6 et le Tableau II.7, ci-dessous.



Figure II.3: Sable de dunes d'Oued Zhor- Skikda

Tableau II.6: Composition chimique du sable de dunes d'Oued Zhor

| Elément | CaO | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | MgO | Na ₂ O | K ₂ O | Cl ⁻ | SO ₃ | PAF |
|---------|------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|------|-------------------|------------------|-----------------|-----------------|------|
| % | 6.67 | 84.97 | 1.89 | 1.09 | 0.20 | 0.14 | 0.5 | 0.00 | 0.01 | 4.52 |

Tableau II.7: Caractéristiques physiques du sable de dune

| Propriétés | Résultats |
|--|-----------|
| Masse volumique apparente (g/cm ³) | 1.40 |
| Masse volumique absolue (g/cm ³) | 2.66 |
| Equivalent de sable ESV visuel (%) | 88 |
| Equivalent de sable ESP au piston (%) | 81 |
| Porosité (%) | 46.33 |
| Module de finesse Mf | 1.52 |
| Teneur en fines (%) | 1.022 |



Figure II.4: Mesure de la propreté du sable (ESV & ESP)

L'analyse chimique du sable a montré qu'il est principalement composé de silice SiO₂ (84.97%). Les autres éléments présents sont en quantité très faible, et la composition chimique ne contient aucune substance nuisible à la qualité du béton de sable, comme les matières organiques, les sulfates, les sulfures ou les carbonates. L'analyse des propriétés physico-chimiques a montré que ce sable, pourrait fournir des résistances acceptables en raison de sa composition chimique siliceuse et sa propreté (ESP= 81), correspondant à une valeur recommandée entre 70 % et 85 % pour les bétons de qualité.

La Figure II.5, montre la distribution granulométrique du sable de dunes, réalisée par tamisage selon la norme NF EN 933-1.

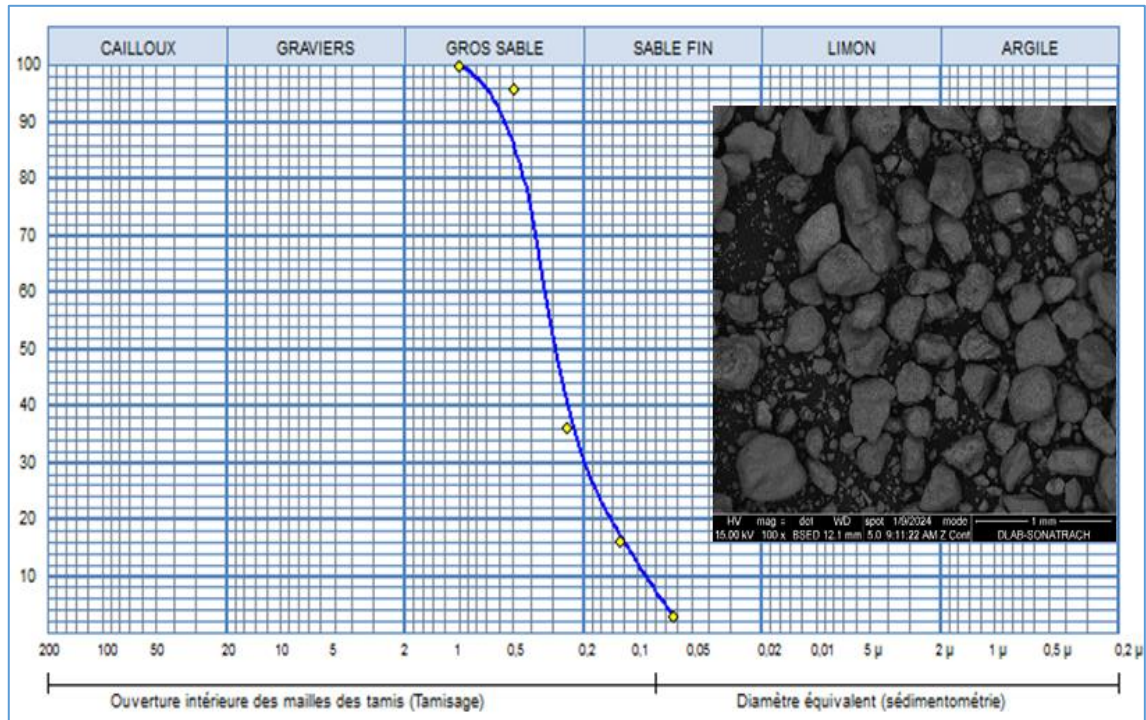


Figure II.5: Courbe granulométrique du sable de dunes d'Oued Zhor

L'analyse granulométrique du sable utilisé révèle son homogénéité et sa finesse, avec un module de finesse (Mf) de 1.52, un faible pourcentage de fines inférieur à 1% et un diamètre maximal (Dmax) de 1mm. Ces caractéristiques confèrent à ce sable une qualité très acceptable pour la réalisation de bétons de qualité standard.

II.2.4. Fines calcaires

Les fines calcaires utilisées proviennent de la carrière ENG Ben Azzouz - Skikda. Ce sous-produit local issu du tamisage (tamis de $80\mu\text{m}$) du reste des roches calcaires lors de la production des granulats, est caractérisé par sa grande finesse et sa nature calcaire principalement composée de carbonate de calcium CaCO_3 (82.93%). Sa composition chimique et ses caractéristiques physiques, sont présentées aux Tableau II.8 et Tableau II.9, respectivement. L'emploi des fines calcaires dans la confection des mélanges de béton de sable est essentiel, car ils permettent le remplissage des espaces intergranulaires du sable utilisé (Sablocrète 1998, Ammari et al., 2020). Cela permettra ainsi d'augmenter sa compacité et d'améliorer les propriétés du béton de sable envisagé, tout en contribuant à la valorisation d'un sous-produit local en réduisant les problèmes environnementaux liés à l'accumulation et à la dispersion de particules fines dans l'atmosphère, l'eau, et le sol.



Figure II.6: Fines calcaires de la carrière ENG de Ben Azzouz - Skikda

Tableau II.8: Composition chimique des fines calcaires

| Elément | CaO | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | MgO | Na ₂ O | K ₂ O | Cl | SO ₃ | PAF |
|---------|-------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|------|-------------------|------------------|-----|-----------------|-------|
| % | 52.07 | 1.68 | 0.98 | 0.59 | 2.34 | 0.04 | 0.23 | 0.0 | 0.0 | 41.93 |

Tableau II.9: Caractéristiques physiques des fines calcaires

| Propriétés | Résultats |
|--|-----------|
| Masse volumique apparente (g/cm ³) | 0.89 |
| Masse volumique absolue (g/cm ³) | 2.66 |
| Surface spécifique Blaine SSB (cm ² /g) | 3526 |

L'analyse chimique des fines, montre qu'ils sont constitués essentiellement de carbonate de calcium CaCO₃ (82.93%), favorisant ainsi la formation des liaisons avec le ciment, lui-même constitué de calcaire. De plus, l'analyse chimique a révélé l'absence d'éléments nuisibles dans leur composition, et le taux de sulfate préoccupant (taux SO₃ = 0.00%), est inférieur aux seuils recommandés.

II.2.5. Adjuvant

L'adjuvant utilisé est le superplastifiant hautement réducteur d'eau Master Glenium 26, de la marque BASF construction chemicals Algerie (Figure II.7). Il est non chloré, à base d'éther polycarboxylates modifié, et conforme aux normes ASTM C-494 Type F&G; BS EN 934-2 et NF EN 934-2. Ce superplastifiant améliore l'ouvrabilité du béton en empêchant la floculation des grains de ciment, ce qui favorise sa réactivité. Les caractéristiques de cet adjuvant sont présentées au Tableau II.10



Figure II.7: Adjuvant superplastifiant Master Glenium 26

Tableau II.10: Caractéristiques de l'adjuvant

| Propriétés | Résultats |
|-----------------------------|------------------------------|
| Aspect | Liquide |
| Couleur | Brun |
| Densité à 25°C | 1,08g/cm ³ ± 0,02 |
| Chlorures | < 0,01% |
| PH | 7 ± 1 |
| Taux des alcalins | < 2% |
| Plage de dosage recommandée | 0.3 à 2 % du poids de ciment |

II.2.6. Eau de gâchage

L'eau utilisée pour la confection et la cure des bétons est l'eau potable du réseau public qui répond à toutes les prescriptions de la norme EN 1008. Ces propriétés sont présentées dans le Tableau II.11.

Tableau II.11: Analyse chimique de l'eau

| Cl (Mg/l) | PH | T° | Salinité | TDS (Mg/l) | Conductivité (Us/cm) | Observation |
|-----------|-----|----|----------|------------|----------------------|---|
| 0.1 | 7.3 | 28 | 0.2 | 297 | 541 | Turbidité: 1.44ntu Eau de bonne qualité chimique |

II.2.7. Analyse des résultats de caractérisation du ciment et des cendres de canne

Les propriétés physiques ont montré que la densité et la finesse des cendres CA étaient plus faibles que celles du ciment. Cette finesse est suffisante pour obtenir une résistance significative selon Sathonsaowaphak et al., (2009); et ce, compte tenu de la bonne corrélation entre la surface spécifique et l'activité pouzzolanique des agro-ciments (Cordeiro et al., 2011 ; Arenas-Piedrahita et al., 2016). En outre, Chindaprasirt et al., (2004) a montré que la différence du poids spécifique des cendres volantes avec différentes valeurs de finesse, était principalement due à la combustion incomplète des particules et donc à la différence des propriétés physiques et chimiques. Le besoin en eau a également augmenté proportionnellement avec le dosage des cendres CA, affectant la maniabilité et la densité à l'état frais et durci des bétons étudiés. Ces résultats sont compatibles avec ceux obtenus dans la littérature (Chandra et al., 2019).

La composition chimique des cendres CA, indique qu'elles sont principalement composées de silice SiO₂ (51.42%), d'oxyde de magnésium MgO (14.42%), d'oxyde de calcium CaO (7.07%), d'une faible quantité d'alumine Al₂O₃ (1.38%) et d'oxyde de fer Fe₂O₃ (1.15%) avec des traces d'autres éléments tels que les alcalins (Na₂O et K₂O), le trioxyde de soufre (SO₃), et les chlorures (CL⁻), ce qui les rend compatible avec le ciment CEMI. Les cendres de canne ne contiennent pas de chaux libre dans leur composition comparativement au ciment, en raison de la réaction de la totalité de l'oxyde de calcium pour former l'une des compositions minéralogiques (C₃S, C₂S, C₃A ou C₄AF). La valeur de MgO (14.42%) est supérieure au seuil recommandé, ce qui indique la nécessité de prêter attention aux bétons à base de cendres CA qui peuvent être soumis à l'attaque sulfatique (Charitha et al., 2021). Cependant, la somme des teneurs en oxydes essentiels pouzzolaniques (SiO₂, Al₂O₃ et Fe₂O₃) est supérieure à 50% du total; et, la teneur en CaO (7.07%) est inférieure à 18%, ce qui classe le matériau de type pouzzolanique en classe F selon la norme ASTM C618-19 (Suraneni et al., 2021). Il est à noter que la PAF de CA de 8.99%, dépassant la valeur limite (6%) fixée par l'ASTM

C618-19 pour les pouzzolanes de classe F (ACI 130R-19, 2019). Ceci pourrait être liée aux matières organiques résultant d'une combustion incomplète de la canne, surtout qu'elle a été opérée en plein air, à une température de calcination basse ou à une longue période de calcination (Werther et al., 2000; Rithuparna et al., 2021; Bahurudeen et Santhanam, 2015), étant donné que la combustion produit des cendres avec une grande quantité d'imbrûlés (Payá et al., 2002); et une PAF élevée réduit la maniabilité (Thomas et al., 2021) et augmente la demande en eau (Chindaprasirt et al., 2004). Néanmoins, les matériaux à réaction pouzzolanique lente pourraient ne pas respecter les limites des normes standards, ce qui permet à CA de satisfaire les exigences (Suraneni et al., 2021). Selon ces résultats, la composition chimique des cendres CA est similaire à celles fréquemment mentionnées dans la littérature (Ayobami, 2021 ; Thomas et al., 2021). Ainsi, les cendres CA peuvent être considérées comme un ajout cimentaire, en plus qu'ils possèdent des atouts tels qu'une faible densité et des propriétés pouzzolaniques qui pourraient affecter positivement les caractéristiques du béton de sable.

II.2.8. Caractéristiques morphologiques

Les micrographies illustrées sur les Figure II.8 à II.11, respectivement montrent la morphologie des matériaux utilisés suivant: le ciment CEMI, les cendres de canne, le sable ordinaire, et les fines calcaires, examinés par microscopie électronique à balayage (MEB) de modèle Quanta 650 – FEI, USA. Étant donné que les propriétés à l'état frais et durci des bétons à base des agro-ciments sont significativement influencées par la réactivité et la morphologie des cendres (Athira et al., 2021).

Les micrographies du ciment indiquées sur la Figure II.8 (a-d), montrent une texture presque homogène avec des particules sphériques regroupées de taille comprise entre 50 et 200 μm . Toutefois, les micrographies MEB des cendres CA montrées sur la Figure II.9 (a-f), révèlent des particules très irrégulières, plus grosses et moins regroupées, avec une surface angulaire et rugueuse par rapport aux particules de ciment, ce qui dénote la nature hétérogène des cendres CA. Les particules de cendres CA présentent une large gamme de tailles, avec des formes allongées mesurant jusqu'à 200 μm de longueur, des formes sphériques pouvant atteindre 50 μm , et les petites particules de taille approximative de 40 et 30 μm aux arêtes vives (Figure II.9 (a)). Cette caractéristique est confirmée par les images de microstructure montrant une grande porosité des cendres de déchets agricoles, avec des particules de formes variées (Charitha et al., 2021). En outre, on peut observer une fissure de quelques centaines de nanomètres à la surface des particules de cendres CA (Figure II.9 (d)), en plus de leur texture poreuse et rugueuse, ce qui augmente leur capacité d'absorption et leur demande en eau. Cette caractéristique est typique des pouzzolanes produites à partir des cendres de déchets agricoles, comme l'ont indiqué He et al., (2020).

En observant les micrographies du sable (Figure II.10 (a-d)), on remarque que la plupart de ses particules ont une forme arrondie et une taille variable allant de 40 à 400 μm , pouvant atteindre 1mm. Les micrographies des fines (Figure II.1 (a-d)), présentent quant à elles une structure homogène, avec des particules régulières d'une taille 50 μm .

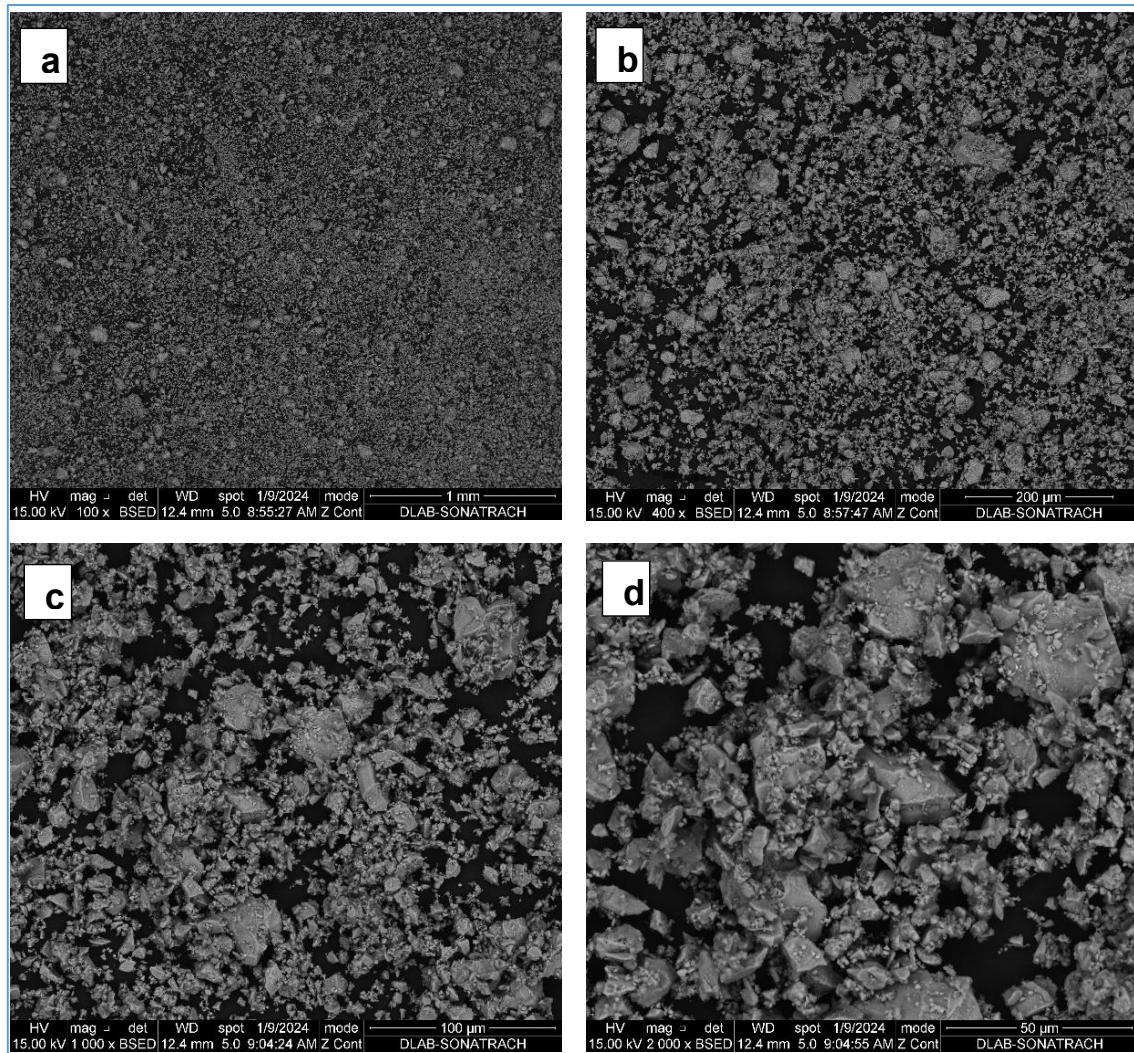


Figure II.8 (a-d): Images MEB du ciment CEMI (Mag (a): x100; (b): x400; (c): x1000; (d): x2000)

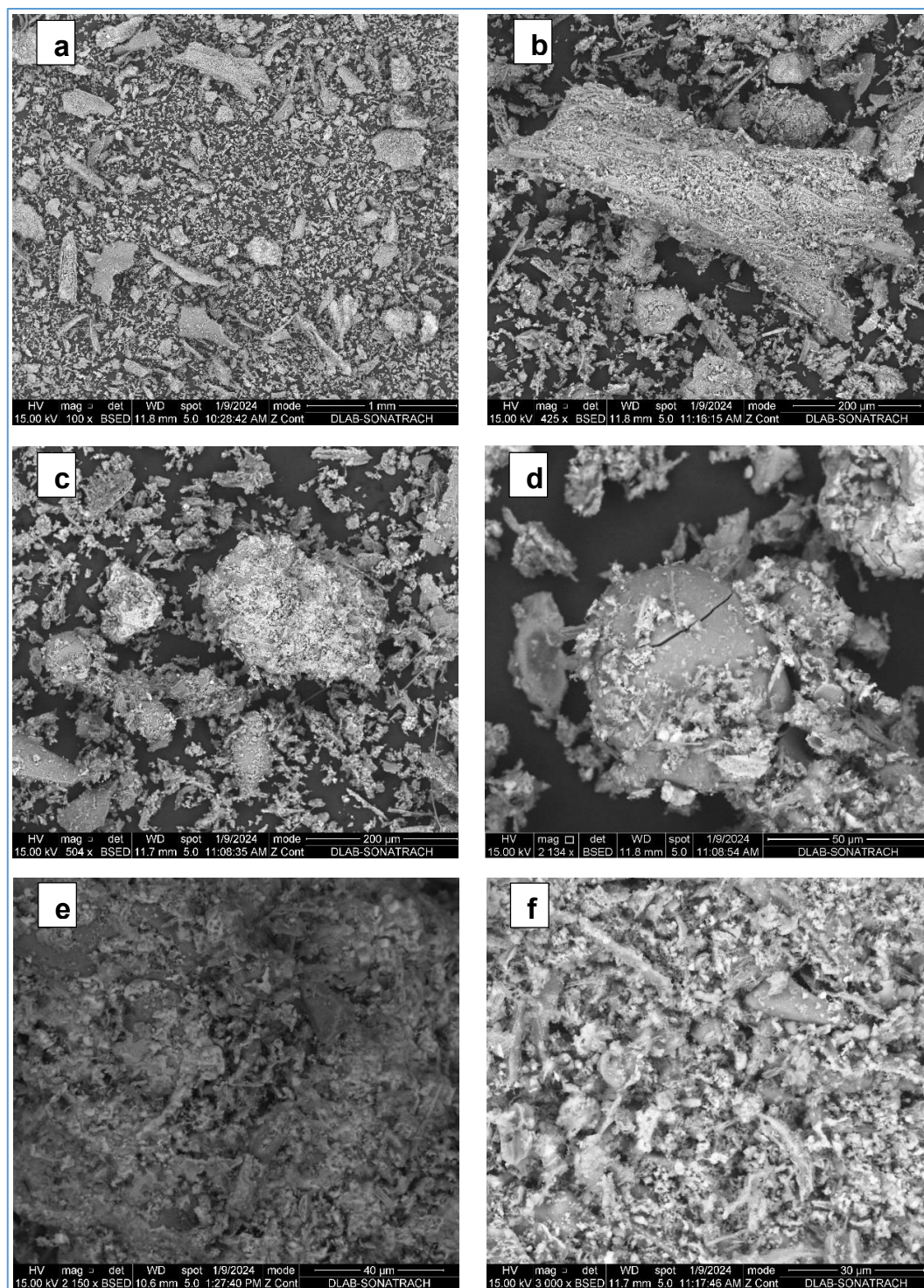


Figure II.9 (a-f): Images MEB des cendres de canne (Mag (a): x100; (b): x425; (c): x504; (d): x2134; (e): x2150; (f): x3000)

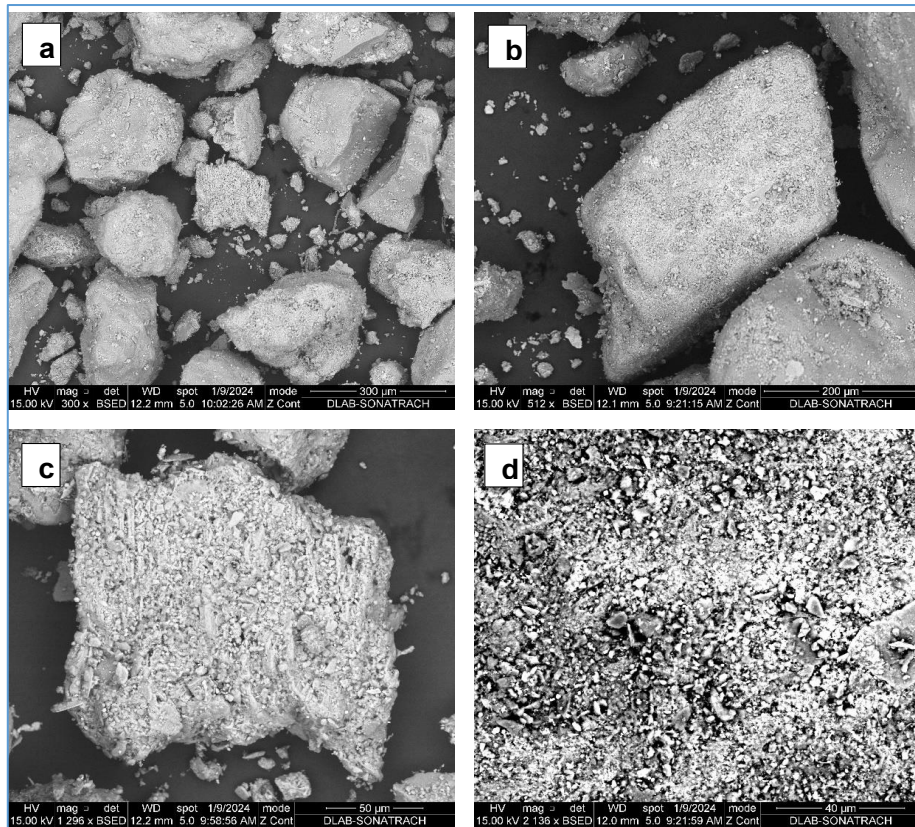


Figure II.10 (a-d): Images MEB du sable de dunes (Mag (a): x300; (b): x512; (c): x1296; (d): x2136)

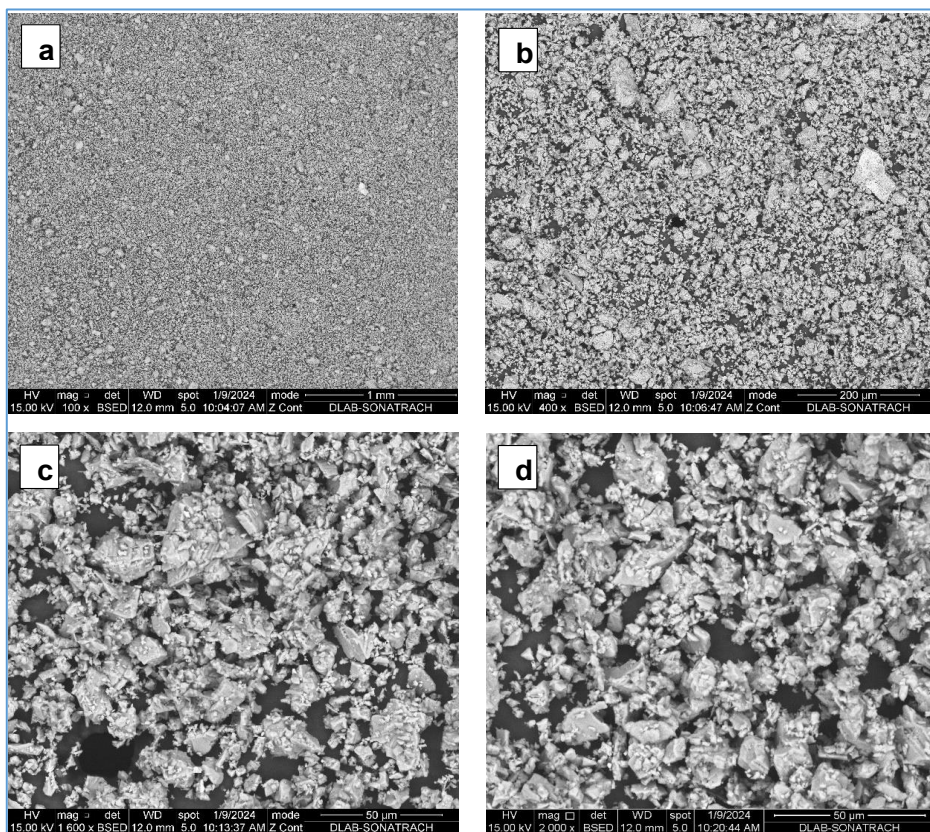


Figure II.11 (a-d): Images MEB des fines calcaires (Mag (a): x100; (b): x400; (c): x1600; (d): x2000)

II.3. Conclusion

Le chapitre examiné porte sur les caractéristiques des principaux matériaux utilisés dans notre étude expérimentale, à savoir: le ciment, les cendres de canne, le sable de dune, les fines calcaires, le superplastifiant et l'eau de gâchage tout en justifiant leur sélection. Ensuite, les résultats des essais de caractérisation physico-chimiques, minéralogiques et morphologiques des différents constituants des bétons de sable de notre programme de recherche, obtenus au moyen de microscope électronique à balayage (MEB), ont été exposés.

Les résultats de caractérisation des matériaux présentés dans ce chapitre ont permis d'évaluer leur conformité aux normes requises, démontrant ainsi leur adéquation à la production des bétons de sable envisagés dans le cadre de notre programme expérimental.

Chapitre III

Programme expérimental et méthodologie d'essais

III. Programme expérimental et méthodologie d'essais

III.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous allons présenter le programme expérimental, la méthode de formulation et la composition des différents mélanges, ainsi qu'une description détaillée des essais expérimentaux réalisés, de la préparation des mélanges et des paramètres d'étude.

Une série d'essais normalisés a été effectuée pour étudier l'influence de l'incorporation d'un ajout cimentaire, c'est-à-dire les cendres de canne à différents dosages en remplacement partiel du ciment CEMI, sur les propriétés physiques et mécaniques du béton de sable en analysant les variations des propriétés mécaniques par DRX et par MEB/EDAX. Nous avons également examiné l'effet de cet ajout sur les paramètres de durabilité dans différents environnements, incluant les conditions hydriques et agressives telles que les acides, les bases, les chlorures, et les sulfates.

L'étude expérimentale a été réalisée au niveau du laboratoire des matériaux de construction du département de génie de civil de l'**université du 20 Août 1955** de Skikda, du Laboratoire National de l'Habitat et de la Construction **LHC-Est** de Skikda, ainsi qu'au laboratoire du Centre de Recherche et de Développement (**CRD**) de Boumerdes de l'entreprise pétrochimique Sonatrach/Algérie.

III.2. Programme expérimental

L'objectif du programme d'investigation est de présenter le processus expérimental suivi pour la mise en œuvre des bétons de sable en substituant une partie du ciment CEMI par des cendres de canne. Quatre taux de substitution (0%, 8%, 16%, 24%) ont été choisis pour élaborer des bétons à base de cendres de canne afin d'examiner et de comparer leurs propriétés par rapport à celles du béton témoin (100% CEMI) pour évaluer l'effet de l'ajout cimentaire CA sur le comportement du béton de sable.

Nous décrirons également les essais réalisés pour caractériser les propriétés des bétons à l'état frais et durci, ainsi que les essais pour évaluer leurs paramètres de durabilité face à différents milieux agressifs (acides, bases, sulfates et chlorures) auxquels ils seront exposés, ainsi que les essais sur leur microstructure.

Notre programme expérimental consiste à:

- Confectionner un béton de sable à partir d'un ciment CEMI sans aucune substitution (béton de sable témoin 0%).
- Confectionner des bétons de sable à base de cendres de canne en remplaçant partiellement une partie du ciment par des cendres de canne avec des taux de (8%, 16%, 24%).

III.3. Formulation des mélanges

La formulation du béton de sable de notre programme expérimental est basée sur la l'approche du projet de recherche et développement français Sablocrête (Sablocrête, 1994). En premier lieu, les composants du mélange de béton de sable sont sélectionnés et définis. Ensuite, les quantités appropriées sont déterminées en privilégiant l'utilisation de matériaux disponibles localement pour des raisons économiques et écologiques. L'étude de la

composition du béton de sable vise à définir le mélange optimal des différents constituants pour obtenir la maniabilité et la résistance mécanique souhaitée.

Quatre formulations de béton de sable à base de cendres de canne ont été développées. La première (CC0) utilisait le ciment CEMI à 100% (béton témoin), tandis que les trois autres (désignées par CC8, CC16 et CC24) utilisaient le ciment CEMI mélangé partiellement aux cendres de canne à des dosages appropriés.

III.3.1. Formulation d'un béton de sable témoin CC0

Nous utilisons l'approche théorique de Sablocrête (Sablocrête, 1994), ajustée expérimentalement, pour élaborer les compositions de bétons de sable.

Le béton de sable témoin se compose de ciment, sable, fines calcaires, superplastifiant, et eau, et sert de référence pour les mélanges à base de cendres de canne.

La formulation du béton de sable témoin CC0 a été réalisée par dosage volumique pour tenir compte des différentes densités des matériaux et déterminer ainsi leurs quantités pondérales, en se basant sur l'approche Sablocrête.

Des tests d'optimisation ont été effectués sur le rapport eau/ciment, variant de 0.55 à 0.7; ainsi que sur le dosage en superplastifiant, ajusté entre 1% à 1.5% en fonction du taux de substitution des cendres de canne. Des essais d'ouvrabilité et de résistance à la compression ont été également réalisés sur les différents mélanges de bétons afin de sélectionner celui offrant la meilleure ouvrabilité et résistance après plusieurs phases d'élaboration.

III.3.2. Formulation du béton de sable à base de cendres de canne

La formulation du béton de sable à base de l'ajout cimentaire CA a été effectuée en incorporant les cendres de canne dans le mélange optimal du béton de sable pour remplacer partiellement le ciment CEMI à des pourcentages variables de 0 à 24%.

Les mélanges à base de cendres de canne ont été élaborés par substitution volumique du ciment CEMI par les dites cendres selon des pourcentages prédéfinis, en utilisant la méthode de substitution équivalente pour déterminer ainsi leurs quantités pondérales. Cela a été réalisé en tenant compte du dosage des paramètres fixes (eau, SP, sable, et fines), déterminés dans la formulation de base du béton de référence (témoin).

Le Tableau III.1 présente les compositions optimisées des mélanges de béton de sable, désignées CC0, CC8, CC16 et CC24. Le Tableau III.2 montre les résultats des formulations correspondantes.

Tableau III.1: Compositions des bétons de sable

| Mélanges | Désignation |
|----------|--|
| CC0 | Béton de référence composé de 100% de ciment CEMI et 0% de cendres de canne CA |
| CC8 | Béton de sable composé de 92% de ciment CEMI et 8% de cendres de canne CA |
| CC16 | Béton de sable composé de 84% de ciment CEMI et 16% de cendres de canne CA |
| CC24 | Béton de sable composé de 76% de ciment CEMI et 24% de cendres de canne CA |

Tableau III.2: Formulations des bétons de sable à base des cendres de canne (pour un 1m³)

| Mélanges | Taux de substitution (%) | $\frac{E}{C+A}$ | Ciment CEMI (Kg) | Cendres de canne CA (Kg) | Eau (L) | Sable ordinaire (Kg) | Fines calcaires (Kg) | Adjuvant SP (L) |
|----------|--------------------------|-----------------|------------------|--------------------------|---------|----------------------|----------------------|-----------------|
| CC0 | 0% | 0,68 | 400 | 0 | 272 | 1173 | 222 | 5,2 |
| CC8 | 8% | 0,68 | 368 | 24 | 272 | 1173 | 222 | 5,2 |
| CC16 | 16% | 0,68 | 336 | 47 | 272 | 1173 | 222 | 5,2 |
| CC24 | 24% | 0,68 | 304 | 71 | 272 | 1173 | 222 | 5,2 |

Le Tableau III.3, présente le programme expérimental, les paramètres fixes et variables, les différents essais réalisés sur le béton à l'état frais (ouvrabilité, teneur en air occlus et densité), les essais effectués à l'état durci (résistance à la compression et à la traction par flexion, essai ultrasonique et au scléromètre), ainsi que les essais de durabilité (absorption d'eau par immersion, absorption capillaire et sorptivité, pénétration des chlorures à 60, 120 jours, attaque chimique par les acides et les bases à 1, 7, 14, 21, 28, 56, 90, 120 jours et l'attaque par les sulfates aux mêmes échéances).

Une analyse structurale par diffraction des rayons X (DRX), par microscopie électronique à balayage (MEB) complétée par une analyse par rayons X à dispersion d'énergie (EDAX) est également incluse.

Tableau III.3: Paramètres et essais effectués sur le béton de sable à base de cendres

| Notation | Paramètres et essais réalisés |
|----------------------|--|
| CC0 (0%) | Béton de sable témoin à base de ciment CEMI |
| CC8, CC16, CC24 | Béton de sable à base de (92%, 84%, 76%) de ciment CEMI et (8%, 16%, 24%) des cendres de canne, respectivement. |
| Paramètres constants | $E/(C+A) = 0.68$ - Sable - Fines calcaires - Adjuvant SP - Eau |
| Paramètres variables | Taux de substitution: ciment et cendres de canne |
| Essais réalisés | <p>**Etat frais</p> <ul style="list-style-type: none"> - Ouvrabilité, - Teneur en air occlus, - Densité à l'état frais. <p>*Etat durci</p> <ul style="list-style-type: none"> - Résistance à la compression à 7, 28, 90, 120 jours, - Résistance à la traction par flexion à 7, 28, 90, 120 jours, - Densité à l'état durci à 7, 28, 90, 120 jours, - Résistance aux ultrasons à 28 jours, - Résistance au scléromètre à 28 jours, - Méthode combinée, - Module d'élasticité des bétons à 28 jours. <p>*Durabilité</p> <ul style="list-style-type: none"> - Absorption d'eau par immersion, - Absorption capillaire et sorptivité, - Pénétration des chlorures à 60 et 120 jours, - Attaque chimique par les acides à 3, 7, 14, 21, 28, 56, 90, 120 jours, - Attaque chimique par les bases à 3, 7, 14, 21, 28, 56, 90, 120 jours, - Attaque par les sulfates à 3, 7, 14, 21, 28, 56, 90 et 120 jours. <p>*Microstructure</p> <ul style="list-style-type: none"> - Analyse structurale par diffraction des rayons X (DRX), - Analyse par microscopie électronique à balayage (MEB) complétée par une analyse par rayons X à dispersion d'énergie (EDAX). |

III.4. Fabrication des mélanges et mise en place

III.4.1. Malaxage des bétons

L'ensemble des mélanges de bétons de sable de notre programme expérimental, sont malaxés dans un malaxeur électrique à axe vertical (Figure III.1) conformément à la norme NF P 18-404, afin d'obtenir un matériau de composition homogène. Le processus de malaxage dure 5 minutes et les composants sont ajoutés dans la cuve dans l'ordre suivant:

- Malaxage à sec à une vitesse lente pendant 1 minute des constituants granulaires (sable, fines calcaires, ciment, et cendres de canne) jusqu'à ce qu'ils soient homogènes,
- Introduction de 70% de l'eau de gâchage et malaxage pendant 3 minutes,
- Introduction du reste d'eau mélangée à l'adjuvant superplastifiant et malaxage pendant 1 minute.



Figure III.1: Malaxage du béton de sable

III.4.2. Moules utilisés

Les mélanges préparés sont versés dans des moules normalisés, pour former des éprouvettes utilisées lors des essais programmés (Figure III.2).

- Moules prismatiques triples de dimension $(40 \times 40 \times 160) \text{ mm}^3$, pour l'essai de compression et de traction par flexion, et pour l'essai de l'absorption capillaire et sorptivité,
- Moules cubiques de dimension $(100 \times 100 \times 100) \text{ mm}^3$ pour l'essai de l'absorption par immersion et pour l'essai de la pénétration des chlorures,
- Moules cubiques de dimension $(150 \times 150 \times 150) \text{ mm}^3$ pour les essais non destructifs au scléromètre et aux ultrasons,
- Moules cubiques de dimension $(50 \times 50 \times 50) \text{ mm}^3$ pour les essais des attaques chimiques par les acides, les bases, et les sulfates.



Figure III.2: Moules normalisés utilisés

III.4.3. Confection des éprouvettes

La préparation des éprouvettes est effectuée selon la norme NF EN 12390-1. Après le malaxage des mélanges, on remplit les moules lubrifiés correspondants aux différents essais programmés. Le serrage dans le moule est obtenu en introduisant le mélange en deux couches vibrées sur une table à chocs ou par piquage et en appliquant 60 chocs pour chaque couche (Figure III.3). La durée de vibration respecte les normes et confère au béton sa compacité. On arase au moyen d'une règle métallique puis on lisse la surface (Figure III.4). Les éprouvettes sont alors recouvertes de film plastique afin d'éviter toute évaporation d'eau, et stockés dans l'environnement du laboratoire sous une température de $T=20\pm 2^{\circ}\text{C}$ pendant 24 heures. Il convient de noter que trois éprouvettes ont été utilisées pour chaque essai afin de tester les différents mélanges de béton.



Figure III.3: Vibration de béton de sable sur la table à chocs



Figure III.4: Remplissage des éprouvettes

III.4.4. Conservation des éprouvettes

Les éprouvettes de béton sont conservées dans leurs moules à l'intérieur du laboratoire sous une température $T=20\pm 2^{\circ}\text{C}$, et une humidité relative d'environ 65 ± 5 pendant 24 heures. Les éprouvettes sont démoulées après 24 heures (Figure III.5), pesées, ensuite elles sont soumises aux divers modes de conservation jusqu'aux échéances fixées pour les essais, tels qu'indiqués sur le Tableau III.4.



Figure III.5: Epreuves démoulées

Tableau III.4: Essais, dimensions des éprouvettes et modes de conservation

| Essais | Epreuves | Modes de conservation |
|--|--|---|
| Résistance de compression Résistance de traction par flexion trois points | $(4 \times 4 \times 16) \text{ cm}^3$ | Cure dans l'eau ($20^\circ\text{C} \pm 2$; 95% HR) jusqu'aux échéances fixées pour les essais (7, 28, 90, 120 jours). |
| Résistance par ultrasons Résistance par scléromètre | $(15 \times 15 \times 15) \text{ cm}^3$ $(15 \times 15 \times 15) \text{ cm}^3$ | Cure dans l'eau pendant 28 jours (Figure III.6). |
| Absorption par immersion | $(10 \times 10 \times 10) \text{ cm}^3$ | 28 jours de cure à l'air libre (20°C , HR $65 \pm 2\%$). |
| Absorption capillaire et sorptivité | $(4 \times 4 \times 16) \text{ cm}^3$ | Cure à l'air libre pendant 28 jours à $20 \pm 2^\circ\text{C}$ au laboratoire. |
| Pénétration des chlorures | $(10 \times 10 \times 10) \text{ cm}^3$ | Après 28 jours de cure dans l'eau, imprégnation des faces latérales avec du paraffine, puis immersion totale dans la solution saline avec 5% de NaCl pendant 60 et 120 jours d'exposition. |
| Attaques chimiques | $(5 \times 5 \times 5) \text{ cm}^3$ | Après 28 jours de cure dans l'eau, immersion totale dans les solutions d'attaque suivantes pendant toute la durée d'exposition de 120 jours (Figure III.7, Figure III.8, Figure III.9): *5% d'acide chlorhydrique (HCl), *5% d'acide sulfurique (H_2SO_4), *5% d'acide nitrique (HNO_3), *5% d'acide acétique (CH_3COOH), *5% d'hydroxyde de sodium (NaOH), *5% de sulfate de magnésium (MgSO_4). |

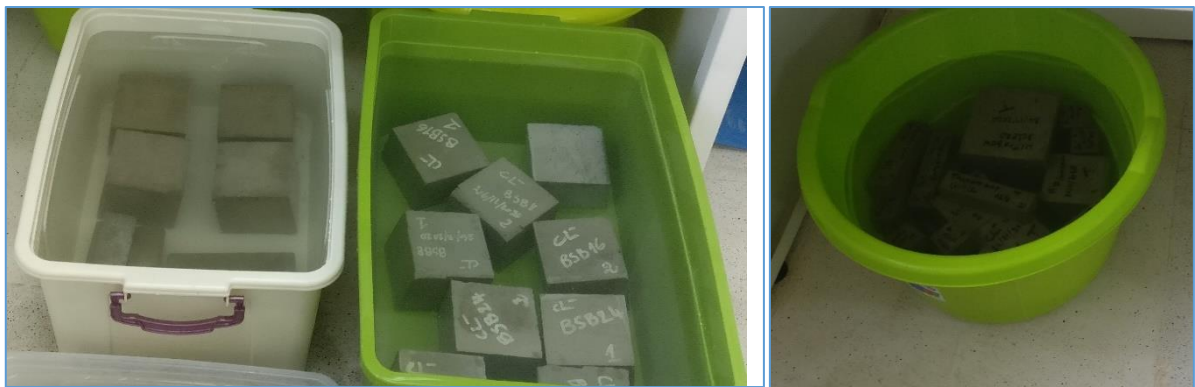


Figure III.6: Conservation des éprouvettes dans l'eau



Figure III.7: Eprouvettes avant conservation dans les solutions d'attaque



Figure III.8: Préparation des solutions d'attaque chimiques



Figure III.9: Conservation des éprouvettes 5x5x5 cm³ dans les solutions d'attaque chimiques

III.5. Méthodes d'essais

III.5.1. Essais à l'état frais

Afin de caractériser le comportement des bétons de sable à base des cendres de canne à l'état frais, nous avons réalisé les essais suivants:

III.5.1.1. Affaissement au cône d'Abrams

L'ouvrabilité des mélanges frais, a été mesurée par l'essai d'affaissement au cône d'Abrams conformément à la norme NF EN 12350-2, pour tous les lots de bétons produits. L'essai consiste à remplir le cône tronqué (cône d'Abrams) fixé sur la plaque d'appui, en trois couches au tiers de la hauteur du moule pour chacune. Après le serrage de chaque couche par piquage 25 fois avec une tige métallique aux dimensions standards. On arase, ensuite on soulève délicatement le moule. On mesure l'affaissement à partir du point le plus haut du béton frais démoulé (Figure III.10). Le résultat est exprimé par un nombre entier A, arrondi au centimètre le plus voisin.



Figure III.10: Essai d'affaissement au cône d'Abrams.

III.5.1.2. Teneur en air occlus

L'air occlus désigne la quantité d'air piégée dans le béton pendant le processus de malaxage. Ce volume est influencé par divers paramètres de composition de béton tels que la nature des granulats, le rapport eau/ciment, le choix de superplastifiant, entre autres.

La teneur en air occlus a été mesurée à l'aide d'un aéromètre calibré sur toutes les séries de béton frais conformément à la norme NF EN 12350-7. L'essai consiste à placer le béton frais dans le conteneur de l'aéromètre, en le serrant à refus par piquage de manière à éliminer autant que possible l'air emprisonné. Le couvercle muni d'un manomètre, est hermétiquement fixé sur le conteneur, et de l'eau est injectée dans le trou. Une pression est ensuite appliquée à l'aide d'une petite pompe manuelle intégrée pour comprimer le béton, et l'aiguille de l'appareil est ajustée au trait rouge avant d'être relâchée. La teneur en air occlus du béton (en %) peut être directement lue sur le cadran du manomètre (Figure III.11).



Figure III.11: Aéromètre à béton

III.5.1.3. Densité à l'état frais

La densité du béton frais, a été évaluée conformément à la norme NF EN 12350-6. Elle a été déterminée à partir de la pesée des moules en considérant le rapport entre la masse du béton frais (masse du moule remplie à laquelle on soustrait la masse du moule vide) sur le volume du moule, comme il est indiqué par la formule (III.1)

$$\rho = \frac{M_t - M}{V} \quad (\text{III.1})$$

Avec:

- ρ : La densité du béton frais en g/cm^3 ,
- M : La masse du moule vide en g,
- V : Le volume du moule en cm^3 ,
- M_t : La masse totale du moule rempli en g.



Figure III.12: Densité du béton frais.

III.5.2. Essais à l'état durci

III.5.2.1 Densité à l'état durci

La densité du béton durci est évaluée conformément à la norme NF EN 12390-7. Elle est définie comme étant le rapport de la masse de l'échantillon M à son volume V (formule (III.2)). Les masses des bétons durcis ont été déterminées par pesées effectuées à 0.01g près. Tandis que les dimensions des échantillons ont été mesurées à l'aide d'un pied à coulisse avec une précision de 0.01cm. La masse volumique à l'état durci exprimée en g/cm^3 , est la moyenne des mesures réalisées sur 3 éprouvettes pour chaque composition.

$$\rho_d = \frac{M_{\text{sec}}}{V} \quad (\text{III.2})$$

Avec:

ρ_d : Densité du béton durci en g/cm^3 ,

M_{sec} : La masse de l'éprouvette en béton durci en g,

V : Le volume de l'éprouvette en béton en cm^3 .



Figure III.13: Densité à l'état durci

III.5.2.2. Essai de rupture par compression uni-axiale

L'essai de compression a été réalisé conformément à la norme NF EN 12390-3 aux échéances 7, 28, 90 et 120 jours, sur les deux parties de l'éprouvette prismatique (40 x 40 x 160) mm³ écrasée par l'essai de traction. Chaque demi-éprouvette est soumise au test de compression, au moyen d'une presse à béton sous une charge uni-axiale appliquée progressivement jusqu'à la rupture de l'éprouvette. L'augmentation de la charge se fait automatiquement et la force de rupture est indiquée en N sur le cadran de la presse ainsi que la contrainte de rupture en compression en MPa (Figure III.15). Cette résistance est calculée suivant la formule (III.4)

$$R_c = \frac{F}{S} \quad (III.4)$$

Avec:

R_c : Résistance en compression (MPa)

F : Charge appliquée (N)

S : Section latérale de l'éprouvette (mm²)



Figure III.14: Essai de compression sur éprouvette 4x4x16 cm³

III.5.2.3. Essai de traction par flexion 3points

La résistance mécanique en traction par flexion (3 points), a été mesurée en utilisant une presse à béton de marque cyber-plus évolution, sur des éprouvettes prismatiques (40 x 40 x 160) mm³ selon la norme NF EN 12390-5 aux échéances 7, 28, 90 et 120 jours, après une cure dans l'eau correspondante à l'âge des éprouvettes à tester. L'essai est réalisé au moyen d'un dispositif de flexion 3 points, comportant deux appuis à section semi-cylindrique, sur lesquels repose l'éprouvette prismatique suivant une force latérale de moulage, et un troisième appui de même diamètre, équidistant des deux premiers et transmettant de la charge F . L'augmentation de la charge se fait automatiquement et la force de rupture est indiquée sur le cadran de la presse en N ainsi que la contrainte de rupture en traction en MPa (Figure III.14). La résistance à la traction par flexion est calculée suivant la formule (III.3).

$$R_t = \frac{1,5Fl}{b^3} \quad (\text{III.3})$$

Avec:

R_t : Résistance à la traction par flexion 3 points (MPa)

F : Charge appliquée (N)

l : Distance entre les appuis (mm)

b : Coté de l'éprouvette (mm)



Figure III.15: Essai de traction par flexion trois points

III.5.2.4. Essai au scléromètre

L'essai au scléromètre est une méthode non destructive permettant d'estimer la résistance du béton au choc (sa dureté de surface). Cette méthode revêt un intérêt particulier en raison de sa simplicité, elle offre la possibilité d'effectuer rapidement des vérifications de conformité des bétons des ouvrages construits et en construction par l'évaluation de la résistance d'impact en surface du béton qui est proportionnelle à sa dureté de surface.

Dans le cadre de notre étude, nous avons utilisé un scléromètre Schmidt modèle N standard étalonné qui permet de faire des mesures sur le béton de résistance 10-70MPa. Nous avons effectué ces mesures sur des éprouvettes en béton de $(150 \times 150 \times 150)$ mm³ conformément à la norme NF EN 12504-2 après 28 jours de cure dans l'eau. L'éprouvette est fixée entre les deux amorces de la presse à béton, après avoir tracé les points de mesure sur sa surface, comme il est montré dans la Figure III.16. La sonde du scléromètre, placée en position perpendiculaire à la surface de l'éprouvette sur les points de mesure, est appuyée, et une masse est projetée sur la surface en béton afin de déterminer la valeur de rebondissement I_s (indice sclérométrique). Par report de l'indice sclérométrique à l'aide des mesures effectuées sur l'abaque de la norme, et en considérant l'inclinaison du scléromètre, nous avons pu obtenir la résistance en compression de l'éprouvette.



Figure III.16: Essai au scléromètre

III.5.2.5. Essai aux ultrasons

L'essai aux ultrasons est un essai non destructif qui consiste à la détermination de la vitesse d'impulsion ultrasonique qui permettra d'évaluer les caractéristiques mécaniques du matériau ausculté, et d'apprécier ainsi son homogénéité en identifiant d'éventuels vides et microfissures.

Le principe de la méthode consiste à mesurer le temps de propagation des ondes ultrasoniques longitudinales en parcourant une distance entre deux points définis sur la surface de l'élément à tester. L'appareil de l'essai comprend des capteurs mis en contact avec le béton, un générateur d'ondes dont la fréquence est comprise entre 10 et 150hz, un amplificateur, un circuit de mesure du temps et un affichage digital du temps mis par les ondes pour traverser le béton. Les mesures de la vitesse de propagation peuvent être effectuées par trois méthodes de transmission en positionnant les deux transducteurs en opposition (transmission directe), à proximité (transmission semi-directe) ou sur le même plan (transmission indirecte ou de surface).

Dans notre étude, nous avons procédé par la méthode directe sur des éprouvettes de béton de sable ($150 \times 150 \times 150$) mm³ conformément à la norme NF EN 12504-4, en utilisant un testeur portable à ultrasons à indication numérique (Pundit Plus TICO) (Figure III.17). Le temps mis par l'onde pour traverser l'éprouvette de l'émetteur au récepteur est affiché sur l'appareil. Le temps ainsi obtenu, va permettre de calculer la vitesse de propagation de chaque mélange par la moyenne de trois mesures effectuées, selon la formule (III.5).

$$V = \frac{L}{T} \quad (\text{III.5})$$

Avec:

V : Vitesse de propagation (m/s),

L : La longueur de parcours (m),

T : Le temps de propagation (s).



Figure III.17: Essai aux ultrasons en transmission directe

III.5.2.6. La méthode combinée

La méthode combinée exprime les résultats de la résistance non destructive des bétons de sable à travers la combinaison des résultats obtenus par la vitesse UPV et l'indice RHN, suivant la formule (III.6).

$$R_{cc} = \frac{I_s^2}{[(3,64+0,023I_s)-(0,56 \times V_p)]^2} \quad (III.6)$$

Avec :

R_{cc}: Résistance à la compression combinée (bars),

I_s: Indice sclérométrique,

V_p: Vitesse de propagation du son (mm/μs).

III.5.2.7. Mesure du module d'élasticité (MOE)

Le module d'élasticité dynamique des bétons de sable a été évalué à 28 jours, à partir des vitesses ultrasoniques mesurées, et ce sur la base de la formule (III.7) (Neville, 1995).

$$E_d = \frac{\rho \cdot V^2 (1+\nu)(1-2\nu)}{(1-\nu)} \quad (III.7)$$

Avec:

E_d: Le module d'élasticité dynamique (MPa),

ρ: La densité du béton durci (kg/m³),

V : La vitesse des ultrasons (km/s),

ν : Le coefficient de Poisson.

III.5.3. Essais de caractérisation physique et de durabilité

III.5.3.1. Essai d'absorption d'eau par immersion

L'essai d'absorption par immersion a été réalisé conformément à la norme NBN B 15-215 sur des éprouvettes (100×100×100) mm³, préalablement séchées à l'air pendant 28 jours à

l'intérieur du laboratoire avant d'être testées. L'essai consiste à mettre les éprouvettes cubiques (10x10x10) cm³ en béton dans un étuve à 105 °C jusqu'à une masse constante, ensuite les immerger complètement dans l'eau à 20°C pendant 24 heures, c'est-à-dire jusqu'à saturation du matériau. Ensuite, les éprouvettes sont retirées et pesées (Figure III.18) afin d'estimer approximativement le volume des vides dans le béton de sable à base de cendres de canne. Le coefficient d'absorption par immersion (Ab) est calculé selon la formule (III.8).

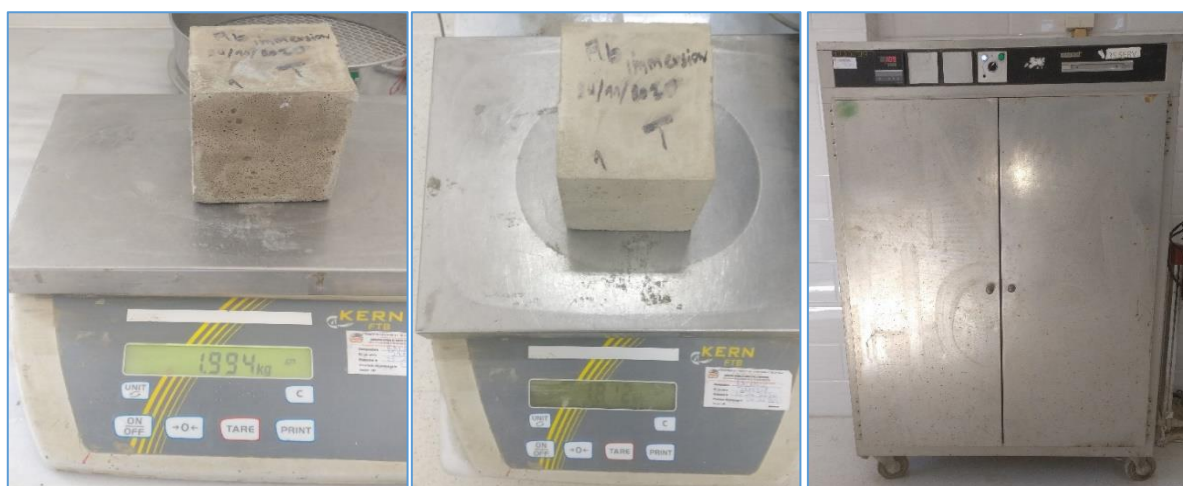
$$Ab \% = \frac{(M_h - M_s)}{M_s} \times 100 \quad (III.8)$$

Avec :

M_h : Masse de l'éprouvette saturée d'eau (g),

M_s : Masse de l'éprouvette sèche (g),

Ab : Coefficient d'absorption d'eau par immersion (%).



Après passage à l'étuve

Après immersion dans l'eau

Séchage à l'étuve

Figure III.18: Essai d'absorption d'eau par immersion

III.5.3.2. Essai d'absorption capillaire et sorptivité

L'absorption capillaire est le processus consistant à évaluer le taux d'absorption par capillarité, causé par la force de succion, d'une éprouvette prismatique de béton. L'essai d'absorption capillaire a été effectué conformément à la norme NF EN 13057 sur des éprouvettes de dimensions (40x40x160) mm³, préalablement conservées à l'air libre pendant 28 jours à 20 ± 2°C à l'intérieur du laboratoire, avec les faces latérales scellées afin d'éviter l'évaporation latérale de l'eau absorbée pendant l'essai (Figure III.19).

La masse initiale des éprouvettes scellées a été déterminée (M₀), avant d'être soumises à une absorption unidirectionnelle d'eau par le bas immergée sur une hauteur maximale d'eau de 3mm, maintenue constante pendant toute la durée de l'essai (environ 168 heures). Le gain de masse des éprouvettes dû à la remontée capillaire de l'eau, est mesuré à des intervalles de temps réguliers après les avoir essuyées avec un chiffon absorbant, puis replacées dans le bac à eau. Cela permettra de déterminer l'absorption capillaire (formule (III.9)), qui est tracée en fonction de la racine carrée du temps écoulé pour obtenir la sorptivité (S) (formule (III.10)).

$$I = \Delta W / A \quad (\text{III.9})$$

$$S = I / t^{(1/2)} \quad (\text{III.10})$$

Avec:

S : La sorptivité ($\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{1/2})$),

I : L'eau cumulée absorbée par unité de surface de béton au temps écoulé t (kg/m^2),

ΔM : Le gain de masse par unité de surface (kg), M0 masse initiale de l'éprouvette (kg),

M_x : La masse de l'éprouvette à une échéance donnée (kg),

A : La section de la face immergée (m^2),

t : Le temps écoulé au poids mesuré (h).



Figure III.19: Eprouvettes avec faces latérales enveloppées pour l'essai de l'absorption capillaire

III.5.3.3. Essai de pénétration des chlorures

L'essai a été réalisé conformément aux normes UNI 7928 et JIS A 1171 sur des éprouvettes de béton de dimensions $(100 \times 100 \times 100) \text{ mm}^3$, préalablement conservées dans l'eau à une température de $20 \pm 2^\circ\text{C}$ pendant 28 jours. Ensuite, ces éprouvettes ont été complètement immergées pendant 60 et 120 jours dans une solution saline qu'on change tous les 28 jours, composée d'eau déminéralisée contenant 5% de chlorure de sodium NaCl, après que leurs surfaces latérales aient été enduites de paraffine pour assurer une diffusion unidirectionnelle des chlorures. La profondeur de pénétration des ions chlorures a été enregistrée pour les échéances fixées par la méthode de l'indicateur colorimétrique à base d'une solution de nitrate d'argent (AgNO_3) pulvérisée sur la section fraîchement divisée axialement de l'éprouvette (Figure III.20). Le nitrate d'argent réagit à la fois avec les ions chlorure (Cl^-) et les groupes hydroxyle (OH) pour former du chlorure d'argent blanc (AgCl) et de l'oxyde d'argent brun foncé (Ag_2O).

La profondeur de pénétration des chlorures a été mesurée à partir de la précipitation de chlorure d'argent blanc, mesurée à l'aide d'un pied à coulisse. Ainsi, le coefficient de diffusion apparent des chlorures, a été déduit sur la base de la formule de la seconde loi de Fick en régime non stationnaire (formule (III.10)) (Russo, 2020). La perte de masse et la densité des bétons ont été également évaluées à l'aide de la formule (III.11).

$$X = 4\sqrt{Dt} \quad (\text{III.11})$$

$$\text{Gain de masse (\%)} = \frac{M_1 - M_2}{M_1} \times 100 \quad (\text{III.12})$$

Avec:

X : La profondeur de pénétration des chlorures (m),

t : La durée d'immersion dans la solution saline (s),

D : Le coefficient apparent de diffusion des chlorures (m^2/s),

M1 et M2 : Masses des échantillons avant et après immersion dans la solution saline (g).



Figure III.20: Essai de pénétration des chlorures

III.5.3.4. Essai d'attaque chimique par les acides, les bases et les sulfates

Les essais ont été réalisés sur des éprouvettes en béton de dimensions ($50 \times 50 \times 50$) mm^3 conformément à la norme ASTM C267 pour évaluer leur résistance aux attaques acides, basique et aux sulfates. Les éprouvettes ont été conservées dans l'eau pendant 28 jours, puis essuyées et pesées pour obtenir leur poids de référence. Toutes les éprouvettes ont été entièrement immergées dans six types de solutions chimiques de concentration similaire de 5%, et renouvelées à chaque changement de PH (Figure III.21), comprenant l'acide chlorhydrique (HCl), l'acide sulfurique (H_2SO_4), l'acide nitrique (HNO_3), l'acide acétique (CH_3COOH), l'hydroxyde de sodium (NaOH) et les sulfates de magnésium (MgSO_4). Les éprouvettes ont été retirées des solutions agressives à des intervalles de temps spécifiques de 3, 7, 14, 21, 28, 56, 90 et 120 jours. Elles ont été évaluées visuellement, nettoyées pour éliminer le béton altéré, la surface essuyée à l'aide d'un chiffon absorbant et laissées à sécher à température ambiante pendant 30 minutes avant les tester.

La résistance chimique du béton de sable à base de cendres de canne dans différents environnements agressifs, a été évaluée en mesurant la variation de masse (perte ou gain de masse) avec une précision de 0.01 en utilisant la formule (III.12) pour les périodes spécifiées. En outre, la variation de la longueur de chaque spécimen, a été mesurée avec un pied à coulisse pour déterminer la variation de leur volume (formule (III.13)), ainsi que leur taille géométrique.

$$\text{Variation de la masse (\%)} = \frac{(M_2 - M_1)}{M_1} \times 100 \quad (\text{III.13})$$

Avec:

Variation de la masse (%): peut-être une perte ou un gain de masse (%),

M1 et M2: La masse (gr) des échantillons avant et après immersion dans la solution agressive, respectivement.

$$\text{Variation volume (\%)} = \frac{(V2-V1)}{V1} \times 100 \quad (\text{III.14})$$

Avec:

Variation de volume (%), est la variation de volume des éprouvettes après 120 jours d'immersion dans la solution agressive.

V1 et V2 sont les volumes (mm³) des éprouvettes avant et après immersion dans la solution; agressive.



Figure III.21: Conservation des éprouvettes (50x50x50) mm³ dans les solutions d'attaque chimiques

III.5.4. Essais sur la microstructure des bétons de sable

Pour la caractérisation de la microstructure des bétons de sable étudiés, nous avons opté pour les techniques d'analyse par diffractométrie des rayons X (DRX) et par microscopie électronique à balayage (MEB) assistée par la spectroscopie de rayons X à dispersion d'énergie (EDAX), effectuées au niveau du Centre de Recherche et de Développement (CRD) de Boumerdes de l'entreprise pétrochimique Sonatrach/ALGERIE et dont les caractéristiques sont présentées ci-dessous. Ces techniques sont très adaptées pour étudier la microstructure de notre béton de sable à base de cendres de canne.

III.5.4.1. Analyse par diffractométrie des rayons x (DRX)

a. Principe d'analyse

L'analyse par diffraction des rayons X (DRX) est une technique d'analyse qui utilise la diffraction des rayons X sur la matière. Cette méthode permet de différencier des produits ayant la même composition chimique, mais présentant des formes cristallographiques différentes, telles que les différentes formes de silice SiO₂ (quartz, cristobalite, etc.), les différents types d'acier (ferritique, austénitique, etc.) ou encore les différentes formes d'alumine (corindon, alumine, etc.).

L'analyse par diffraction des rayons X (DRX) a été réalisée à l'aide d'un diffractomètre XPERT-PRO PANALYTICAL, USA, effectuée sur des échantillons finement broyés, prélevés sur des fragments des bétons CC0 et CC8 (résultat optimal) après l'essai d'écrasement à 28 jours.

L'échantillon solide finement broyé est monté sur un porte échantillon adéquat, puis soumis à un faisceau de rayons X pour être diffractés par les plans réticulaires des phases cristallines présentes. En effet, il existe une relation entre l'angle du faisceau diffracté et la distance réticulaire séparant les plans d'atomes au sein d'un réseau cristallin; celle-ci est régie par la loi de Bragg $n\lambda = 2d\sin\theta$ (où λ = longueur d'onde en angströms, d = distance réticulaire en angströms et θ = angle de diffraction ou de réflexion en degrés).

Les diffractogrammes ainsi obtenus, à l'aide d'un diffractomètre à rayons X, sont interprétés. Les positions et les intensités des pics observés sont comparés aux fichiers de référence **PDF-ICDD** (Powder Diffraction File- International Center for Diffraction Data) pour l'identification des phases minéralogiques présentes.

b. Conditions d'analyse

Diffractomètre PANalytical : XPERT-PRO, tube radiogène céramique à anticathode de cuivre, puissance du générateur à RX : 40 mA, 45 kV

-Goniometer = PW3050/60 (Theta/Theta)

-Logiciel pour l'acquisition des données: DataCollector de PANalytical

-Logiciel pour traitement des données: HighScore Plus de PANalytical

-Longueur d'onde CuK α [Å] : "1.54060"

-Angle de départ [°2Th.] : 5.0084

-Angle final [°2Th.] : 69.9654

-Taille du pas [°2Th.] : 0.0170

-Temps du pas [s] : 101.4427

III.5.4.2. Analyse par microscopie électronique à balayage (MEB/EDAX)

a. Principe d'analyse

La Microscopie Electronique à Balayage repose sur les interactions entre les électrons et la matière, offrant des images haute résolution de la surface de l'échantillon avec une profondeur de champ supérieure à la microscopie optique.

L'analyse au microscope électronique à balayage a été effectuée par le MEB: Quanta 650 – FEI, USA, assisté par la spectroscopie de rayons X à dispersion d'énergie (EDAX) sur les échantillons prélevés sur les fragments des bétons CC0 et CC8 (résultat optimal) après l'essai d'écrasement à 28 jours, pour caractériser les changements morphologiques (fissures du

béton), et pour la détermination de la composition chimique/élémentaire. L'analyse de la morphologie des matériaux de base de béton de sable a été aussi réalisée.

b. Conditions d'analyse

Microscope électronique à balayage **MEB: Quanta 650-FEI**, USA, assisté par la spectroscopie de rayons X à dispersion d'énergie (**EDAX**).

-Voltage utilisé (ou Tension d'accélération) (HV) : 12,5-20 kV

-Zoom (Mag): 50-9008×

-Observations: en mode «électrons secondaires» (det LFD - det ETD) et en mode «électrons rétrodiffusés» (det BSED)

-Distance de travail (WD) : 9.7-10.8, 23.2, 31.1 mm

-Diamètre du faisceau d'électron (Spot) : 4.0 - 6.0

-Taille de l'image complète «largeur du champ horizontal» (HFW) : 10-500 μ m, 1-2mm

III.6. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons exposé:

- Le programme expérimental utilisé pour cette étude,
- La formulation des différents mélanges des bétons de sable à base de cendres de canne, les paramètres de composition, ainsi que le mode de fabrication et de conservation des éprouvettes,
- L'ensemble des méthodes d'essais effectuées sur les bétons de sables, qui se résument à:
 - Essais sur le béton frais:
 - ↪ Essai d'affaissement au cône d'Abrams,
 - ↪ Essai de mesure de la teneur en air occlus,
 - ↪ Essai de densité à l'état frais.
 - Essais mécaniques sur le béton durci:
 - ↪ Essai de densité à l'état durci,
 - ↪ Essai de rupture en traction par flexion 3points,
 - ↪ Essai de rupture par compression uniaxiale,
 - ↪ Essai au scléromètre,
 - ↪ Essai aux ultrasons,
 - ↪ Essai combiné,
 - ↪ Mesure du module d'élasticité (MOE).
 - Essais de caractérisation physiques et de durabilité:
 - ↪ Essai d'absorption d'eau par immersion,
 - ↪ Essai d'absorption capillaire et sorptivité,
 - ↪ Essai de pénétration des chlorures,
 - ↪ Essai d'attaque chimique par les acides, les bases, et les sulfates.
 - Essais sur la microstructure:
 - ↪ Essai d'analyse par diffractométrie des rayons x (DRX),
 - ↪ Essai d'analyse par microscopie électronique à balayage (MEB/EDAX).

Les résultats des essais et les discussions seront présentés dans les chapitres suivants.

Chapitre IV

Effet des cendres de canne sur les propriétés physiques et mécaniques des bétons de sable

IV. Effet des cendres de canne sur les propriétés physiques et mécaniques du béton de sable

IV.1. Introduction

Ce chapitre expose les résultats et les discussions des essais physiques, mécaniques et micro structurels effectués sur les bétons de sable à base de cendres de canne. L'objectif est d'analyser de manière explicite les phénomènes observés, en soulignant l'effet du taux de remplacement et la nature de l'ajout sur les propriétés du béton de sable à l'état frais telles que l'ouvrabilité, la teneur en air occlus, et la densité; ainsi que sur ses performances mécaniques comme la résistance en compression et en traction par flexion, la dureté de surface et l'homogénéité, la densité et le module d'élasticité, réalisés sur le béton durci. Les caractéristiques des mélanges préparés ont été analysées et comparés à un béton témoin CC0 (100% CEM I), avec une corrélation établie entre leurs paramètres respectifs.

L'approche microstructurelle permet d'analyser les changements dans les propriétés mécaniques, nous permettant ainsi d'expliquer de manière précise les phénomènes observés, en étudiant l'influence de l'ajout des cendres de canne sur leurs caractéristiques. Celle-ci est représentée à partir de diffractogrammes pour l'analyse par DRX et des micrographies pour les images MEB et des graphes et des tableaux pour l'analyse EDAX. L'analyse minéralogique qualitative effectuée par la spectroscopie de rayons X à dispersion d'énergie (EDAX) permettra d'identifier les divers éléments qui composent le béton de référence ainsi que le béton à base d'ajout.

IV.2. Effet des cendres de canne sur les propriétés physiques du béton de sable

IV.2.1. Ouvrabilité

La Figure IV.1 illustre la variation de l'ouvrabilité du béton de sable en fonction du dosage des cendres CA, mesurée par l'affaissement au cône d'Abrams.

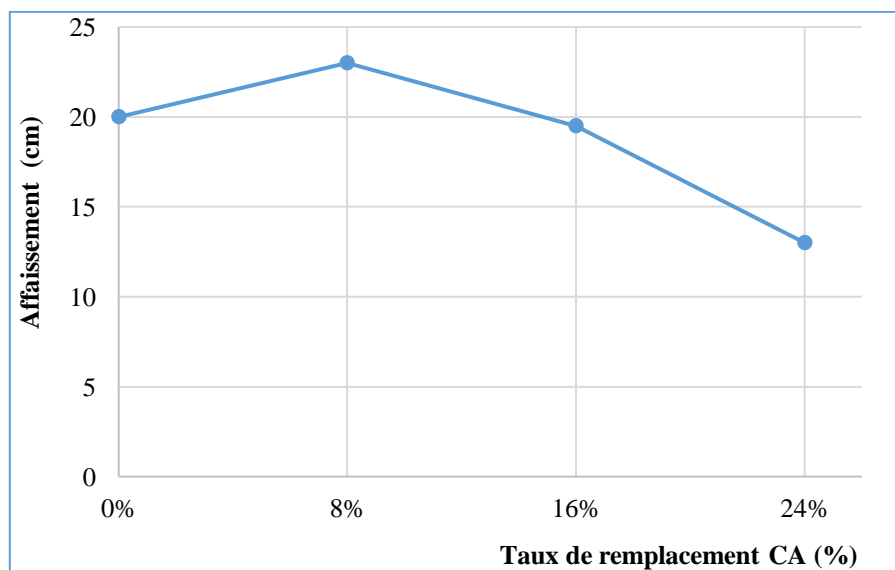


Figure IV.1 : Effet % CA sur l'ouvrabilité du béton de sable

Les résultats de l'affaissement sont différents pour tous les mélanges pour un même rapport Eau/Liant et un même dosage de superplastifiant SP. L'ouvrabilité augmente jusqu'au dosage de 8% CA (optimum) avec un affaissement de 23cm, d'où un béton plus maniable que le témoin CC0 (20cm). Ensuite, elle diminue avec l'augmentation de la teneur en CA pour atteindre la valeur la plus basse (13cm) pour le mélange avec 24% CA.

Cette tendance correspond au comportement normal des pouzzolanes issues des agglomérats, car le taux de 8% est la proportion appropriée qui s'insère dans les vides, entraînant ainsi une friction moindre des particules et une bonne ouvrabilité. Toutefois, la diminution de l'ouvrabilité est attribuable à la faible densité de CA, à sa teneur en carbone, ainsi qu'aux particules irrégulières et très poreuses, provoquant une rétention d'eau, comme il a été démontré dans des études antérieures (Raheem et Ikotun., 2020; Chindaprasirt et al., 2004; Temitope et al., 2021). Par conséquent, la demande en eau augmente proportionnellement au dosage de CA, comme il a été indiqué par Fadele et Otieno (2022), ce qui se traduit par l'absorption d'eau des mélanges lors du malaxage, pouvant absorber l'adjuvant SP, réduisant ainsi son efficacité, et pouvant également affecter le système d'entraînement de l'air du béton, comme l'a souligné Pedersen, (2008) et reporté par Ayobami (2021), entraînant ainsi une baisse de l'ouvrabilité.

Les valeurs d'affaissement des bétons de sable obtenues 130-230mm, sont acceptables et sont en adéquation avec les résultats des travaux de recherche menés par Charitha et al., (2021).

IV.2.2. Teneur en air occlus

La Figure IV.2 illustre l'évolution de la teneur en air occlus en fonction du taux de remplacement CA.



Figure IV.2: Effet % CA sur la teneur en air occlus du béton de sable

Il est observé que la teneur en air occlus augmente avec l'ajout des cendres de canne. On note une augmentation de 3.5 % à 7.2 % lorsque le dosage de CA varie de 0 % à 16 %, suivie d'une légère diminution pour le mélange CC24 avec une teneur d'air occlus de 7 %.

L'augmentation de la teneur en air occlus dans le béton est due à la porosité et à la rugosité des particules CA, qui augmentent avec la proportion utilisée. De plus, la rugosité des particules CA a tendance à piéger l'air pendant le malaxage du béton de sable.

Les mélanges CC0 et CC8 se situent dans les limites acceptables, affichant des taux respectifs de 3.5% et 6%, selon les résultats de Sablocrete (1998) et Jiang et al., (2016). Cependant, les mélanges CC16 et CC24 dépassent légèrement la limite standard de 6%, affichant respectivement des taux de 7.2% et 7%.

Selon l'ACI 213 (2003), le béton contenant des granulats d'une taille maximale jusqu'à 19mm devrait avoir une teneur en air occlus entre 4% et 8% (Kockal et Ozturan., 2011), ce qui permet à CA de satisfaire les exigences.

IV.2.3. Densité à l'état frais

Les résultats de la densité à l'état frais suivent la même tendance que l'affaissement (Figure IV.3 et IV.4).

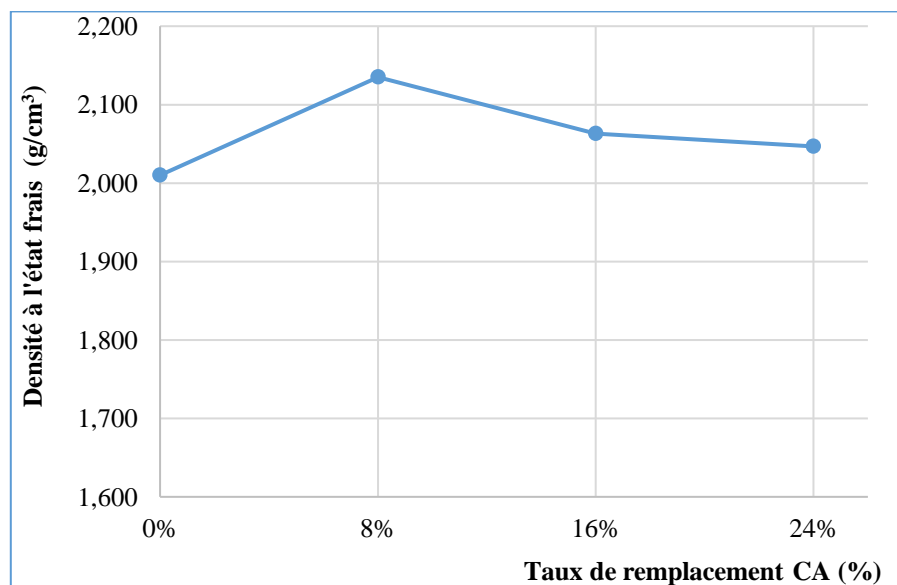


Figure IV.3 : Effet % CA sur la densité à l'état frais du béton de sable

La densité de béton de sable à base de cendres CA augmente pour un taux de 8% CA, atteignant la valeur optimale de 2.135g/m^3 . Ensuite, elle décroît progressivement jusqu'à une valeur de 2.047g/m^3 pour un taux de remplacement CA de 24 %, et le béton témoin CC0 affiche une valeur minimale de 2.010g/cm^3 . Ceci s'explique par le fait que CA remplit les vides autour des particules du ciment jusqu'à un taux optimal de 8%, améliorant la distribution granulométrique et la compacité, augmentant ainsi la densité du béton de sable.

Au fur et à mesure de l'augmentation du dosage CA, une proportion croissante du ciment est remplacée par CA, induisant ainsi une diminution de la densité du mélange à base de CA, tout en étant supérieure à celle du témoin, en raison de l'augmentation de la teneur en air occlus. De plus, ces résultats sont peut-être attribués à l'absorption d'eau et à la faible finesse des particules poreuses de CA, qui entraînent un besoin en eau plus important par rapport au mélange de béton témoin, comme il a été déjà montré par Chandra Paul et al., (2019); Chindaprasirt et al., (2004).

Les propriétés à l'état frais des bétons de sable sont influencées par l'ajout CA (Figure IV.4), et présentent un comportement acceptable.

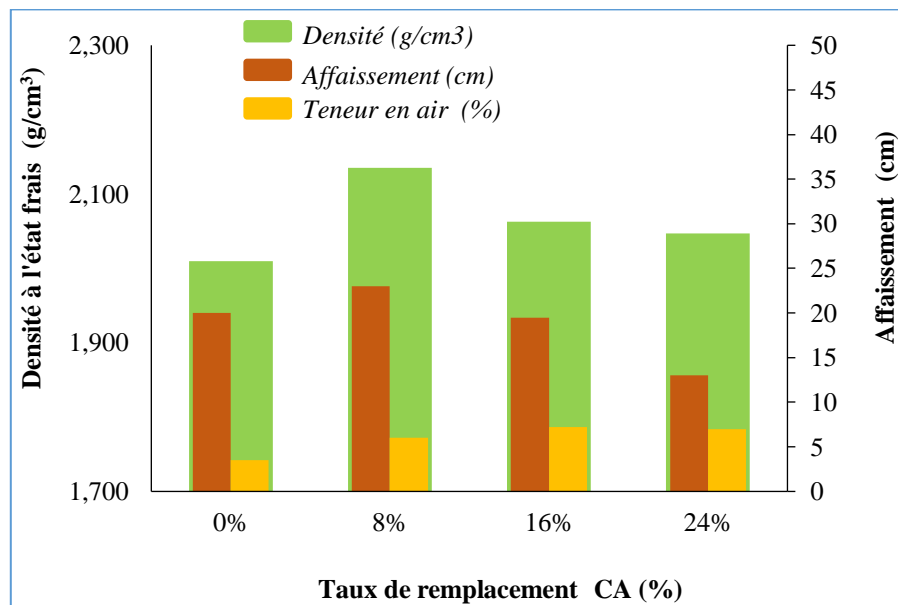


Figure IV.4: Effet % CA sur les propriétés du béton de sable à l'état frais

IV.3. Effet des cendres de canne sur les propriétés mécaniques du béton de sable

IV.3.1. Résistance à la compression

Les Figures IV.5 et IV.7 illustrent les résultats de la variation de la résistance à la compression (R_c) des bétons de sable à base de cendres de canne (CA) pour les échéances 7, 28, 90, et 120 jours, qui tend à s'améliorer tout d'abord pour le taux de 8% (meilleurs résultats); ensuite, elle diminue avec l'augmentation du dosage de CA à tous les âges testés, ce qui est conforme aux conclusions de Xu et al., (2018).

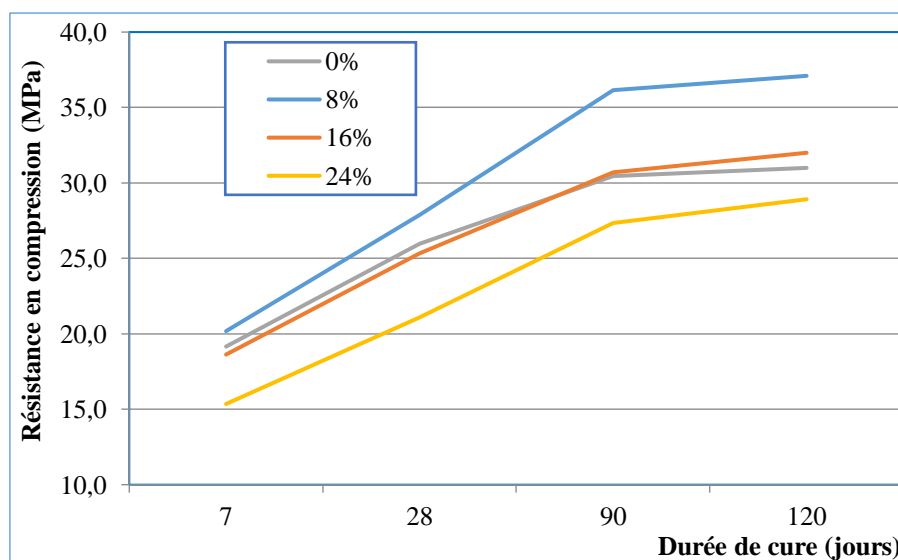


Figure IV.5: Effet de la durée de cure sur la résistance de compression des bétons de sable à base de CA

A 7 jours, le mélange CC8 a montré le meilleur résultat avec une augmentation de la résistance R_c de 5.3%. Toutefois, l'augmentation du dosage de CA de 8% à 24%, induit une diminution de la R_c des bétons à base d'ajout CA, qui est passée de 20.2MPa à 15.4MPa pour les mélanges CC16 et CC24, pour atteindre respectivement 97.2% et 80.1% de la R_c du témoin. Cela est dû au fait que CA comme la plupart des agro-ciments, agit comme filler durant le début de la réaction d'hydratation jusqu'à 28 jours, mais devient moins significatif par la suite (Shatat, 2016; Suraneni et al., 2021; Kalina et al., 2019). L'amélioration de la R_c du mélange CC8 est attribuable au remplissage des vides autour des particules de ciment jusqu'à un taux optimal (8%). Ce qui favorise la formation des produits d'hydratation au jeune âge, qui contribuent à la densification de la matrice et à l'amélioration de la compacité du CC8, et de sa résistance à la compression au jeune âge (Kalina et al., 2019).

Toutefois, une augmentation du taux de CA entraîne une hydratation incomplète du ciment avec ajout. En effet, les particules poreuses de CA absorbent d'avantage d'eau nécessaire à la réaction qui sera libérée lors de l'évolution du processus d'hydratation pour favoriser la réaction du ciment à base d'ajout, ce qui est perceptible à long terme (Van Tuan et al., 2011), provoquant ainsi un allongement du temps de prise et un retard dans la réaction initiale et finale du matériau pouzzolanique dans le béton (He et al., 2020; Sulaiman et al., 2019).

De plus, un taux élevé de la perte au feu des cendres (PAF plus de 10%) a un effet marqué sur la diminution de la R_c au jeune âge (7 jours), avec un léger effet à long terme (plus de 28 jours) (Chusilp et al., 2009). Il est à noter que les ajouts cimentaires à réaction pouzzolanique lente, y compris la classe F, ont montré peu d'effets sur le gain de résistance avant 28 jours (Raheem et Ikotun, 2020; Suraneni et al., 2021). Par conséquent, le taux de 8% a un effet positif sur l'amélioration de la résistance à la compression au jeune âge des bétons de sable, notamment dans les matériaux de construction spécifiques nécessitant une résistance élevée au jeune âge et un décoffrage immédiat.

A 28 jours, une augmentation continue de la R_c est enregistrée pour tous les bétons étudiés, en raison de la continuité du processus de la réaction d'hydratation. Les valeurs de la résistance en compression variaient de 21.1MPa à 27.9MPa; le meilleur résultat étant obtenu avec un dosage de 8% CA, ce qui entraînait un gain de résistance de 7.4%. Au-delà, une diminution de la résistance est notée avec l'augmentation du taux de CA. Ainsi, la résistance de CC16; et CC24 atteignaient respectivement 97.6%; et 81.2% de celle du témoin. A un taux de remplacement plus faible, l'ajout cimentaire agit comme un agent nucléant pour les hydrates, améliorant l'hydratation du ciment (Tantawy et al., 2014); ce qui explique le gain de résistance observé pour le CC8. Or, l'augmentation du dosage des cendres CA a un effet de dilution, augmentant la demande en eau, et forme une couche de particules CA autour des grains de ciment anhydre, retardant l'hydratation du ciment (Shatat, 2016).

En outre, les taux de substitution de CA supérieurs à 20% affectent les mécanismes d'hydratation, et retardent le développement de la résistance, à la fois en compression et en flexion. En effet, la réaction pouzzolanique est régie par la surface spécifique aux premiers stades de la réaction, car une surface spécifique élevée facilite la combinaison de la chaux (Aprianti et al., 2015). Le faible taux de la réaction pouzzolanique entraîne un développement plus lent de la résistance dans les ajouts cimentaires, mais un gain de résistance significatif est généralement observé entre 28 et 90 jours (Nwankwo et al., 2020). Le développement des hydrates tels que le C-S-H peut être vérifié par des observations au MEB.

Ainsi, les bétons de sable incorporant 0-24% CA peuvent être utilisés pour des applications structurelles car la résistance à la compression à 28 jours est supérieure à 20MPa (Bheel et al., 2020); est conforme à la limite inférieure de la résistance pour le béton structurel exigée par ACI 318 (Memon et al., 2022) et le règlement parasismique Algérien RPA99/Version 2003 (Règles Parasismiques Algériennes, 2003).

Le prolongement des essais à 90 et 120 jours, vise à s'assurer que l'augmentation de la R_c au jeune âge est dû à l'effet filler indépendamment des composants inertes du béton, et à détecter si CA est pouzzolanique à long terme (Suraneni et al., 2021; Kalina et al., 2019). En effet, un développement continu de la R_c avec l'âge est remarqué. Les meilleurs résultats sont enregistrés par le mélange CC8 avec une amélioration de la résistance de 18.8% et 21.2% à 90 et 120 jours, respectivement. Un gain de résistance supplémentaire de 0.9% et 1.3% est également affiché aux mêmes âges pour le CC16. Néanmoins, les résistances de CC24 atteignent 89.9% et 94.5% de celles du témoin pour les mêmes âges, ce qui est cohérent avec les résultats de la recherche (Xu et al., 2018; Agwa et al., 2022; Bahurudeen et Santhanam, 2015; Suraneni et al., 2021).

L'accroissement de la résistance est principalement dû à la réaction pouzzolanique car l'hydratation de CA agit comme de la pouzzolane à long terme, et le développement de la résistance devrait durer avec l'âge jusqu'à l'achèvement du processus d'hydratation (Raheem et Ikotun, 2020; Suraneni et al., 2021; Bheel et al., 2020). Aussi, la silice et l'alumine des ajouts cimentaires, réagissent avec l'hydroxyde de calcium $\text{Ca}(\text{OH})_2$ dans le ciment (Aprianti et al., 2015); pour produire des hydrates de silicate de calcium (C-S-H) (Memon et al., 2022) et des hydrates de silicate de calcium et d'aluminium (C-A-S-H), qui influencent fortement le développement de la résistance; et l'hydratation de la silice elle-même sera responsable de l'augmentation de la R_c (Shatat, 2016). La diminution de la concentration en Ca^{2+} due à la réaction pouzzolanique entraîne également une amélioration de l'hydratation du ciment (Van Tuan et al., 2011).

Une augmentation des taux de remplacement des ajouts cimentaires à long terme, entraîne une réaction pouzzolanique plus lente et une diminution de la résistance du mélange. Etant donné que la réduction du dosage en ciment induit une diminution de la quantité de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, en raison de la silice et de l'alumine qui n'ont pas réagi, et qui ne sont pas suffisantes pour la réaction pouzzolanique, entraînant une faible résistance à la compression (Xu et al., 2018) à moins qu'elles n'aient des propriétés hydrauliques (Nwankwo et al., 2020; Ayobami, 2021). Selon Pandey et al., (2019), la formation excessive de silice entraîne la perte d'une matrice cimentaire homogène et hydratée, qui est lessivée.

De plus, la diminution de la résistance est affectée à la fois par la faible finesse, entraînant une augmentation des besoins en eau, et par la perte au feu (PAF) élevée par rapport au ciment (Aprianti et al., 2015; Chindaprasirt et al., 2004), compte tenu que la PAF et la finesse sont interdépendantes (Ayobami, 2021). Ceci s'explique par la nature plus grossière des particules de carbone présentes dans les cendres (Ayobami, 2021), et par leur structure poreuse qui absorbent plus d'eau nécessaire à la réaction. Cette eau sera libérée au cours de l'évolution du processus d'hydratation pour améliorer la résistance, ce qui est perceptible à long terme (Van Tuan et al., 2011), car il existe une bonne corrélation entre la surface spécifique et l'activité pouzzolanique des matériaux poreux (Cordeiro et al., 2011). Une faible finesse entraîne une diminution de la réaction pouzzolanique, tandis qu'une grande quantité de PAF, conduit généralement à une réduction de la teneur en oxydes majeurs qui affecteront l'hydratation du ciment (Chusilp et al., 2009), ce qui entraînera une baisse de la résistance à

la compression (Fadele et Otieno, 2022; Rithuparna et al., 2021; Cordeiro et al., 2011; Chindaprasirt et al., 2004; Ayobami, 2021; Fadele et Otieno, 2022).

Les résultats ont révélé que l'incorporation de 0-24% de CA comme ajout cimentaire dans le béton de sable a présenté des performances mécaniques satisfaisantes, notamment une amélioration de la résistance à la compression pour le dosage de 8% (optimal) à tous les âges. Ces résultats sont conformes à la littérature, qui préconise l'utilisation des ajouts cimentaires dans la plage de 5-10% en poids afin d'obtenir un béton avec des propriétés mécaniques remarquables (Agwa et al., 2022).

IV.3.2. Résistance à la traction par flexion

Les Figures IV.6 et IV.7 montrent l'évolution de la résistance de traction par flexion (R_t) de béton de sable à base de cendres de canne à 7, 28, 90 et 120 jours.

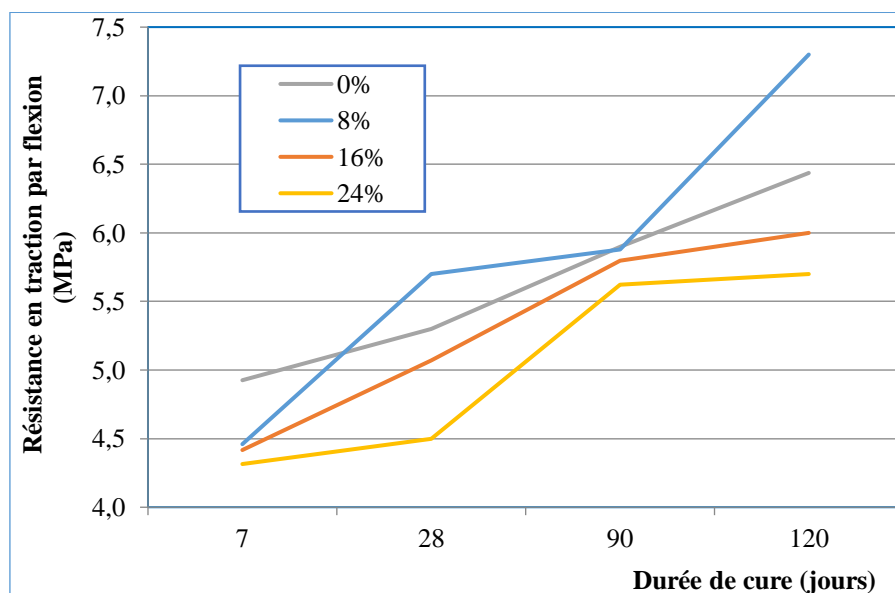


Figure IV.6: Effet de la durée de cure sur la résistance de traction par flexion des bétons de sable à base de CA

A 7 jours, la R_t a tendance à diminuer de 4.9MPa à 4.3MPa lorsque le dosage en CA augmente de 0% à 24%. Le béton témoin a obtenu le meilleur résultat de 4.9 MPa, tandis que les résistances des bétons avec ajout, i. e., CC8, CC16 et CC24, était respectivement de 90.5%, 89.7%, et 85.8% du témoin.

A 28 jours, la résistance R_t a montré une tendance significative à la croissance enregistrant une augmentation de 7.5 % pour le CC8 (5.7MPa, meilleur résultat). Ensuite, elle a diminué avec l'augmentation du dosage de CA pour CC16 et CC24, qui ont atteint respectivement 93.2 % et 88.6 % du témoin. Ces résultats correspondent aux valeurs normales de la R_t du béton obtenu lors de l'utilisation de ces agro-ciments, avec des effets significatifs observés à 28 jours et au-delà (Xu et al., 2018; Charitha et al., 2021; Fadele et Otieno, 2022; Zerihun et al., 2022).

Ainsi, à 90 jours, le CC8 présentait une résistance à la flexion identique à celle du témoin de 5.9MPa (optimum). L'augmentation de la proportion de CA a entraîné une légère

diminution de la R_t du béton de sable avec ajout, qui était respectivement de 98.3% et 95.3% du témoin pour les mélanges CC16 et CC24.

Après 120 jours, une amélioration de la résistance de 13.4%, a été notée pour CC8 (7.3MPa optimum). Tandis que, les mélanges CC16 et CC24 ont enregistré respectivement 93.2%, et 88.6% du témoin. Cela est principalement lié à l'effet de la réaction pouzzolanique lente de l'ajout CA, qui a été observée après 28 jours, et n'apparaît pas au jeune âge (Suraneni et al., 2021), entraînant un développement plus tardif de la résistance, mais un gain significatif est généralement observé entre 28 et 90 jours. Aussi, des niveaux de remplacement supérieurs à 20% affectent le mécanisme d'hydratation, entraînant un gain de résistance plus lent (Nwankwo et al., 2020).

Les résultats montrent un comportement intéressant des bétons de sable à base de cendres de canne dans des proportions allant de 0 à 24%. Cela est particulièrement remarquable lorsqu'on ajoute le dosage optimal de 8%, ce qui entraîne une amélioration significative de la résistance à la traction par flexion. Ces résultats sont prometteurs pour la fabrication des produits en béton structuraux, car les résistances de compression et de traction par flexion obtenues sont respectivement supérieures à 20MPa et 4MPa (Suraneni et al., 2021).

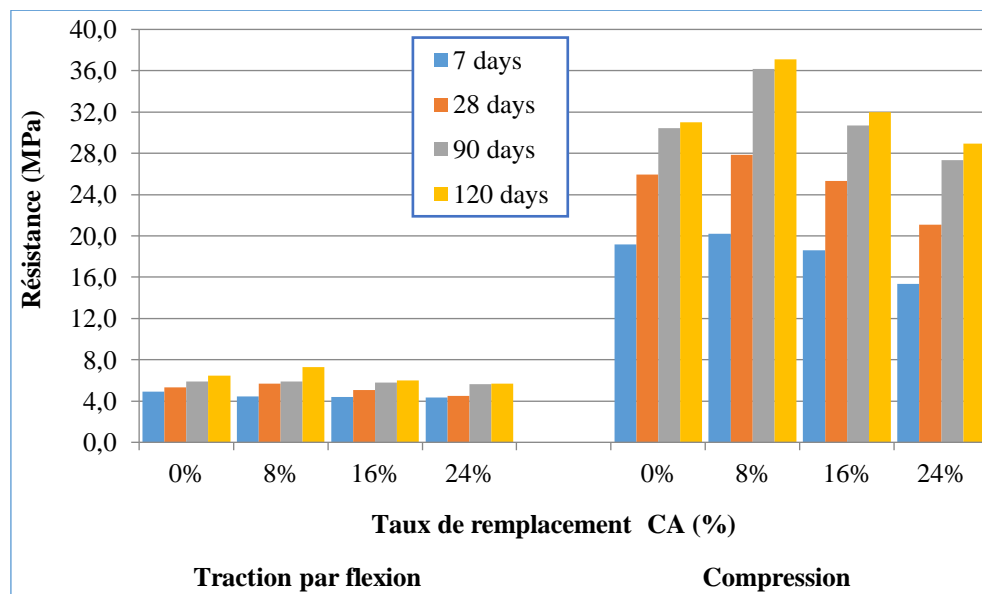


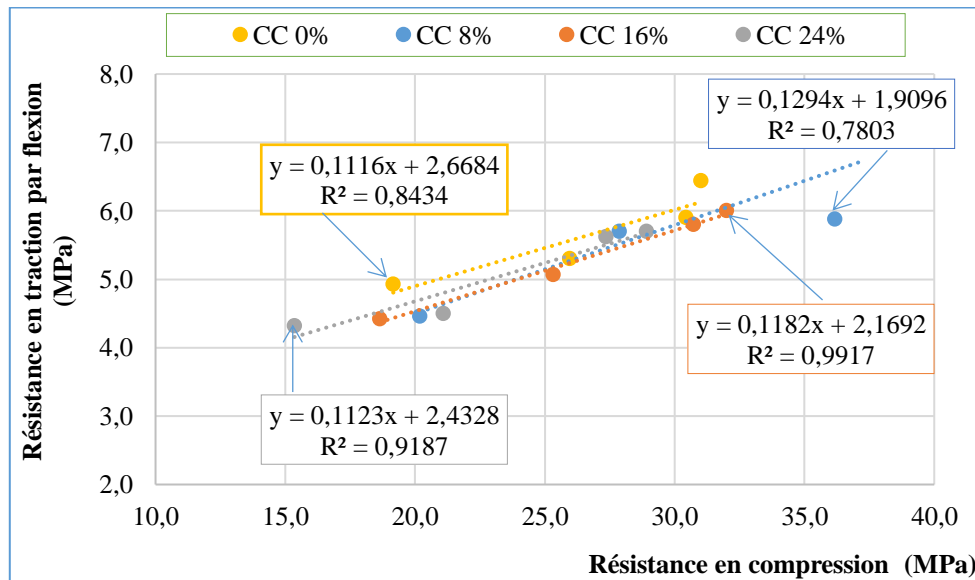
Figure IV.7: Résistances en compression et en traction par flexion des bétons de sable à base de cendres de canne

* Corrélation entre la résistance en compression et en traction par flexion

Il est observé une relation de corrélation positive entre les résistances de flexion et de compression des bétons avec ajout de CA, indépendamment de l'âge (Figure IV.8). L'amélioration de la résistance en flexion entraîne également une amélioration de la résistance en compression. Les coefficients de corrélation se situent entre 0.88 et 0.99, ce qui confirme la fiabilité des équations présentées dans le Tableau IV.1. Les mélanges CC16 et CC24 affichent des coefficients de corrélation plus élevés (0.996 et 0.958) que les CC0 et CC8 (0.918 et 0.883). Cette différence s'explique par la progression plus lente de la résistance due à la réaction pouzzolanique de l'ajout AC, qui croît de manière régulière pour des taux de 16-24% et montre une augmentation marquée pour 8%.

Tableau IV.1: Formules de corrélation des résistances de compression vs celles de traction par flexion des bétons de sable à base de cendres de canne.

| Bétons ID | Formules | R ² |
|-----------|------------------------|----------------|
| CC0 | $y = 0.1116x + 2.6684$ | 0.8434 |
| CC8 | $y = 0.1294x + 1.9096$ | 0.7803 |
| CC16 | $y = 0.1182x + 2.1692$ | 0.9917 |
| CC24 | $y = 0.1123x + 2.4328$ | 0.9187 |

**Figure IV.8:** Corrélation des résistances de compression vs traction par flexion des bétons de sable à base de cendres de canne

IV.3.3. Densité

Les résultats obtenus montrent que la densité des bétons avec ajout CA est plus élevée que celle du témoin pour tous les âges (Figure IV.9). Les valeurs optimales ont été enregistrées avec un taux de 8%, tandis que le taux de 24% a montré une valeur optimale à 28 jours (Figure IV.10). Ceci, bien que la densité de l'ajout CA, soit plus faible par rapport au CEMI; toutefois, l'absorption d'eau de CA est plus élevée, entraînant une rétention d'eau qui affecte la densité. Ce facteur est l'un des nombreux éléments qui influent sur la densité, comme, les composants intrinsèques du béton; le type de ciment ou de liant; le rapport eau/liant; et l'absorption d'eau du béton.

Une légère réduction de la densité a été observée entre 7 et 28 jours pour tous les mélanges, sauf pour le taux de 16%. Néanmoins, une augmentation de la densité des bétons avec l'ajout CA a été constatée entre 28 et 90 jours, passant de 2093.8 à 2078.1kg/m³, pour les taux de 8% à 24%. Cette augmentation est due à la réaction pouzzolanique de l'ajout CA qui entraîne la formation d'hydrates avec un volume plus de deux fois supérieur à celui du ciment anhydre, ce qui conduit à un affinement des pores. Par conséquent, la porosité diminue et la densité de la pâte de ciment durcie augmente (Shatat, 2016). Ces résultats sont en adéquation avec les valeurs de résistance à la compression et à la traction par flexion, ce qui signifie qu'une densité plus élevée produit une résistance mécanique supérieure.

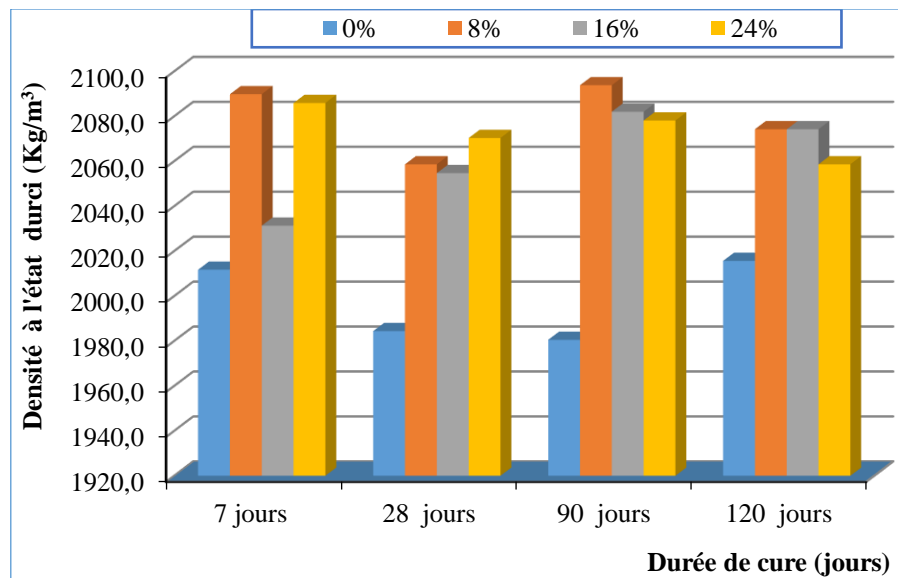


Figure IV.9: Effet de la durée de cure sur la densité à l'état durci des bétons de sable à base de cendres de canne

A 120 jours, on a observé une légère diminution de la densité des bétons avec l'ajout CA, passant de 2074.2 kg/m^3 à 2058.6 kg/m^3 pour des taux de CA variant entre 8% et 24%, alors que le béton témoin avait une densité de 2015.6 kg/m^3 . Cette baisse est due à la forme des particules de cendres et de la réaction pouzzolanique plus lente de CA, mais également à l'augmentation du dosage en CA qui entraîne la présence de portlandite (densité plus faible) et une formation moins importante de gel (C-S-H) (Memon et al., 2022). De plus, un excès de silice se forme et est lessivé, comme signalé par Pandey et Kumar (2019), ce qui explique la baisse de densité. Par ailleurs, un taux élevé de perte au feu (PAF) a un effet significatif sur la réduction de la résistance à la compression au jeune âge (7 jours), avec effet mineur à long terme (après de 28 jours) (Chusilp et al., 2009), ce qui influence la densité.

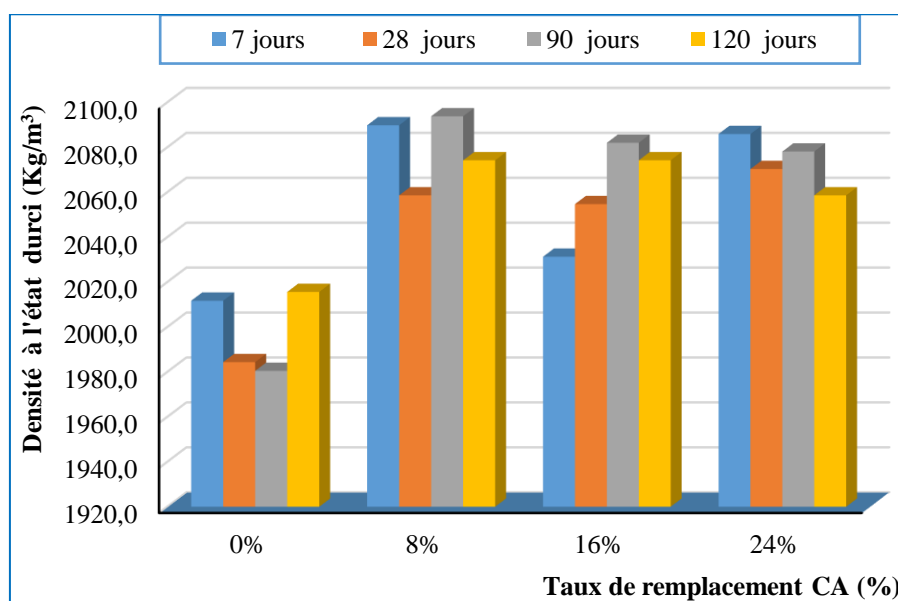


Figure IV.10: Effet % CA sur la densité à l'état durci des bétons de sable à base de CA

Cette tendance est significative et conforme au comportement normal des pouzzolanes, comme l'ont confirmé plusieurs auteurs (Raheem et Ikotun, 2020), qui ont exploré l'utilisation d'agro-ciments dans le béton de sable, et ont noté une densité de 1800-2100 kg/m³. Cela indique que les résultats de la densité des bétons de sable étudiés se situent dans cette plage, et sont inférieurs de 9.8 à 17.3% par rapport au béton ordinaire de 2200-2400kg/m³, et sont même appropriés pour être utilisés comme béton de sable structurel.

* Corrélation entre la densité et les résistances mécaniques à 28jours

Une relation de corrélation polynomiale existe entre la densité et les résistances mécaniques (compression et traction par flexion) à 28j (Figure IV.11), dont les coefficients de corrélation R à la compression et à la traction par flexion valent 0.841 et 0.740, respectivement (Tableau IV.2).

Tableau IV.2: Formules de corrélation des résistances de compression vs celles de traction par flexion des bétons de sable à base de cendres de canne.

| Corrélations | Formules | R ² |
|---|-------------------------------------|----------------|
| Résistance de compression vs la densité à 28j | $y = -0.0042x^2 + 17.049x - 17198$ | 0.7082 |
| Résistance de traction vs la densité à 28j | $y = -0.0006x^2 + 2.5848x - 2605.8$ | 0.5483 |

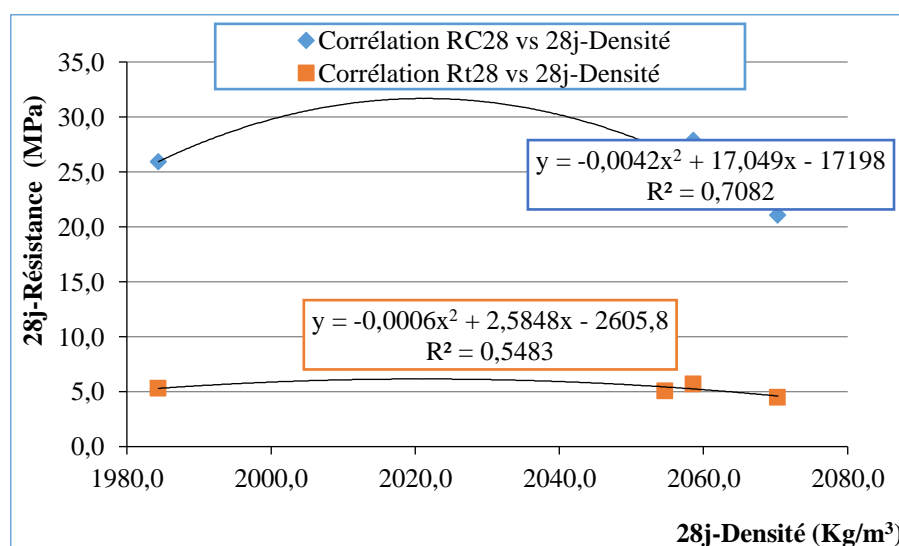


Figure IV.11: Corrélation de la densité vs les résistances mécaniques à 28jours

IV.3.4. Module d'élasticité (MOE)

Les résultats de MOE illustrés dans la Figure IV.12, suivent une tendance similaire à la résistance à la compression à 28 jours, car les deux paramètres ont montré une croissance comparable (Neville, 2011; Hossain, 2004), variant de 23.6GPa à 24.2GPa. Le MOE du béton de sable à base de l'ajout CA était plus élevé que celui du témoin (23.6GPa), avec un taux de variation de 5.3 %; 2.0%; et 2.3 % pour CC8; CC16; et CC24, respectivement.

Cela est confirmé par de nombreux auteurs qui ont constaté que les agro-ciments améliorent le MOE et, par conséquent, la résistance à la compression lorsque la porosité du béton diminue. Etant donné que la corrélation entre les performances mécaniques et la porosité dépend de la nature des agro-ciments ainsi que de la quantité utilisée en tant qu'ajout

cimentaire dans le béton, ce paramètre exerce une influence significative sur le module d'élasticité (MOE) et doit être pleinement pris en considération (Aprianti et al., 2015).

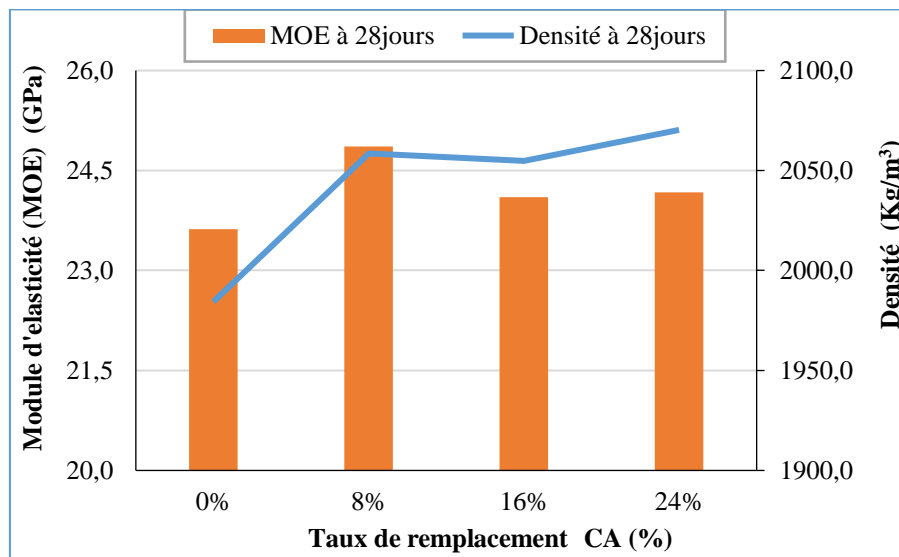


Figure IV.12: Effet % CA sur le MOE du béton de sable à base d'ajout CA

L'optimum de MOE a été affiché par le mélange CC8 (24.9GPa) qui a également enregistré les meilleures valeurs de résistance à la compression et à la traction par flexion à 28 jours; en raison de la taille réduite des pores résultant de l'effet filler, et de la formation des hydrates (Jagadesh et al., 2018), qui peut être constaté à partir des observations au MEB. Cependant, une augmentation du dosage de CA a entraîné une diminution du MOE, en raison de la teneur en silice excessive qui dépasse la quantité de CA requise pour réagir avec $\text{Ca}(\text{OH})_2$, entraînant une réduction de la résistance (Xu et al., 2018), en plus de l'augmentation de la porosité et de la faible densité de CA.

Les bétons de sable ayant une résistance à la compression de 24-30MPa, ont généralement un module d'élasticité (MOE) d'environ 22GPa à 28 jours (Sablocrete, 1994). Cependant, les résultats obtenus de 23.6 à 24.9GPa dépassent ces valeurs et se situe même dans la plage normale de MOE du béton structural.

En conséquence, l'emploi de CA jusqu'à 24% peut contribuer à l'amélioration du MOE du béton de sable, qui est un paramètre essentiel dans la conception des structures.

***Corrélation entre le MOE et les paramètres de densité; de résistance à la compression; et de vitesse aux ultrasons à 28jours**

Les Figures IV.13 - IV.15, illustrent une relation de corrélation polynomiale à la fois entre: le MOE et la densité; le MOE et la résistance en compression; ainsi que, le MOE et la vitesse ultrasonique, à 28 jours, dont le coefficient de corrélation R vaut 0.76; 0.85; et 0.96, respectivement. Les équations de corrélation présentées seront pratiques pour prédire ou estimer à la fois le MOE et la densité ou bien la résistance à la compression et la vitesse aux ultrasons lorsque l'une de leurs valeurs est disponible (Tableau IV.3).

Tableau IV.3: Formules de corrélation du MOE vs la densité, la résistance à la compression R_c , UPV à 28 jours des bétons de sable à base de cendres de canne.

| Corrélations | Formules | R^2 |
|--------------------------------------|-------------------------------------|--------|
| MOE vs la densité à 28jours | $y = -0.0003x^2 + 1.1366x - 1135.4$ | 0.5838 |
| MOE vs la résistance R_c à 28jours | $y = 0.0709x^2 - 3.379x + 63.919$ | 0.727 |
| MOE vs UPV à 28jours | $y = 0.001x^2 - 6.9804x + 12669$ | 0.9313 |

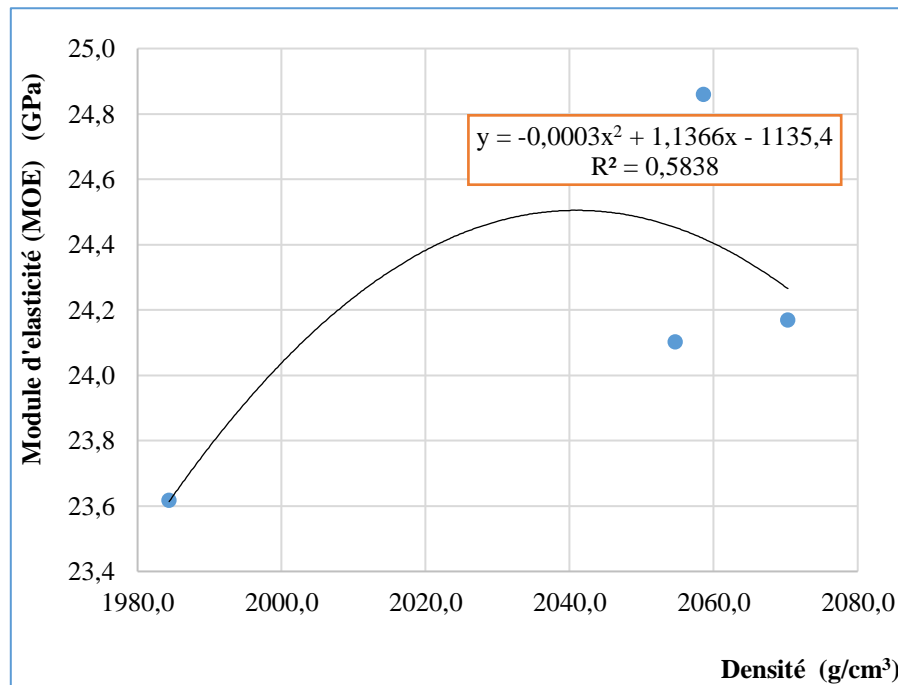


Figure IV.13: Corrélations MOE vs la densité à 28 jours des bétons de sable à base de CA

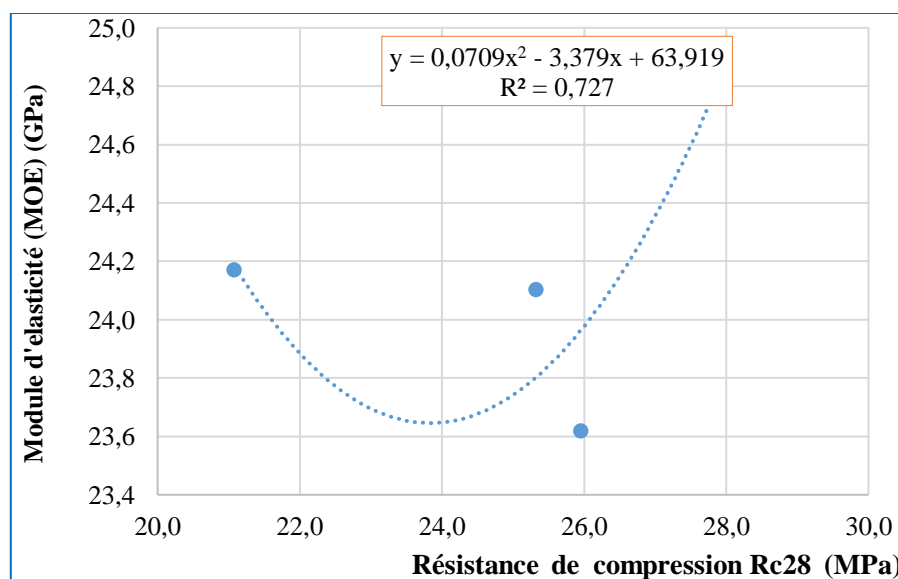


Figure IV.14: Corrélations MOE vs la résistance R_{c28} des bétons de sable à base de CA

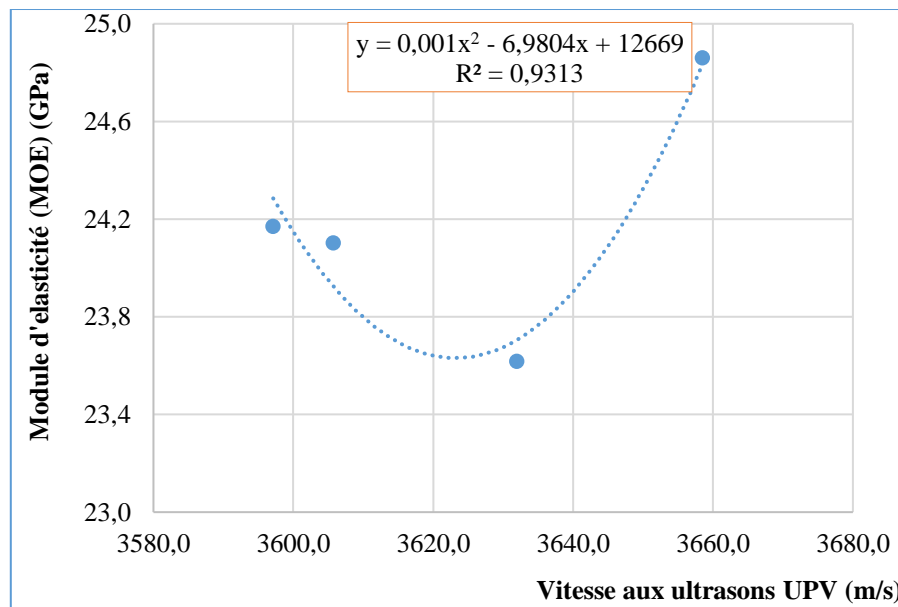


Figure IV.15: Corrélations MOE vs UPV à 28 jours des bétons de sable à base de CA

IV.3.5. Résistance par scléromètre (RHN)

Les résultats de la dureté de surface par rebond à 28 jours sont présentés sur la Figure IV.16.

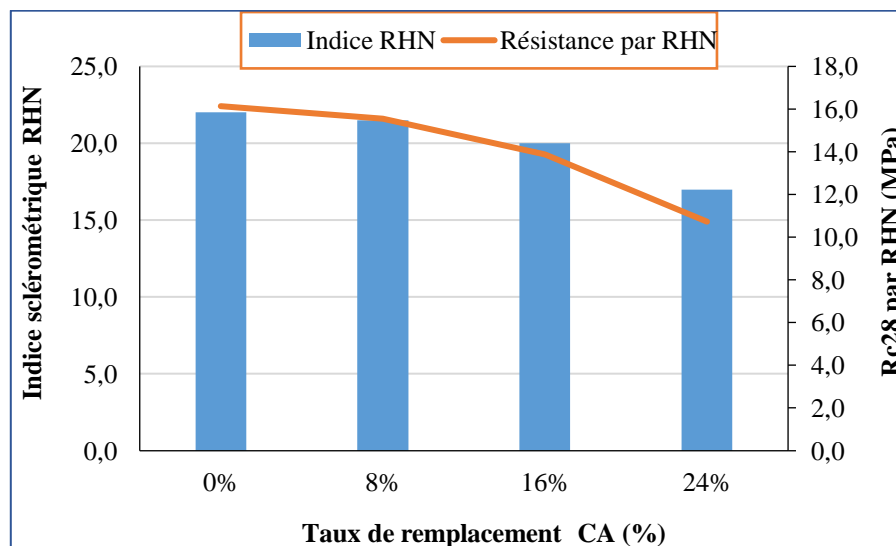


Figure IV.16: Effet % CA sur l'indice sclérométrique et la dureté de surface à 28 jours des bétons de sable à base de CA

Ils montrent que l'augmentation du taux de l'ajout CA de 0% à 24% entraîne une baisse de l'indice sclérométrique moyen de 22 à 17, ainsi qu'une diminution de la résistance par rebond de 16.1MPa à 10.7MPa. Par conséquent, la dureté de surface diminue de 3.6%; 14%; et 33.5% pour les mélanges CC8; CC16; et CC24, respectivement par rapport au béton témoin CC0.

Cela est dû à l'augmentation de la porosité du béton de sable avec le dosage en CA, qui a entraîné la réduction de la résistance par rebond, et ces constatations sont confirmées par les

résultats de la porosité dans la section ci-dessous. Selon Neville (2011), la présence de vides dans le béton entraînerait un résultat plus faible de la résistance par rebond. Ceci est dû au fait que l'énergie absorbée par le béton est liée à la combinaison de la force et de la rigidité qui régit le nombre de rebonds. De plus, la rigidité du béton est influencée par le type de granulat utilisé. L'essai au scléromètre mesure les propriétés uniquement de la zone de surface du béton sur environ 30mm de profondeur, selon la norme BS 1881-202: 1986 (abrogée). La mesure de la dureté d'impact permet d'évaluer la force d'un matériau de manière non destructive.

Ainsi, l'ajout cimentaire CA dans le béton de sable conduit à diminuer sa dureté de surface par rebond à 28 jours.

* Corrélation entre la résistance par l'indice de rebondissement et la résistance par compression

Il y a également une excellente corrélation linéaire entre l'indice sclérométrique et la dureté de surface, avec un coefficient de corrélation R très précis de 0.99. Cela indique que plus l'indice sclérométrique est élevé, plus la surface est dure. De plus, il existe une bonne relation polynomiale entre l'indice RHN et la résistance à la compression par écrasement à 28 jours, avec un coefficient de corrélation R de 0.95 (Figure IV.17 et Tableau IV.4). La différence dans les résultats de résistance est due aux méthodes de mesure de chaque technique, car la résistance à la compression par écrasement prend en compte l'effet de l'ensemble de l'échantillon, tandis que l'essai au scléromètre ne considère que la surface.

Tableau IV.4: Formules de corrélation de l'indice RHN vs les résistances de compression par RHN et par écrasement des bétons de sable à base de cendres de canne

| Corrélations | Formules | R ² |
|------------------------------------|-------------------------------------|----------------|
| Indice RHN vs Rc28 par RHN | $y = 0.9263x + 7.0854$ | 0.9997 |
| Indice RHN vs Rc28 par compression | $y = -0.0815x^2 + 4.6836x - 45.538$ | 0.9045 |

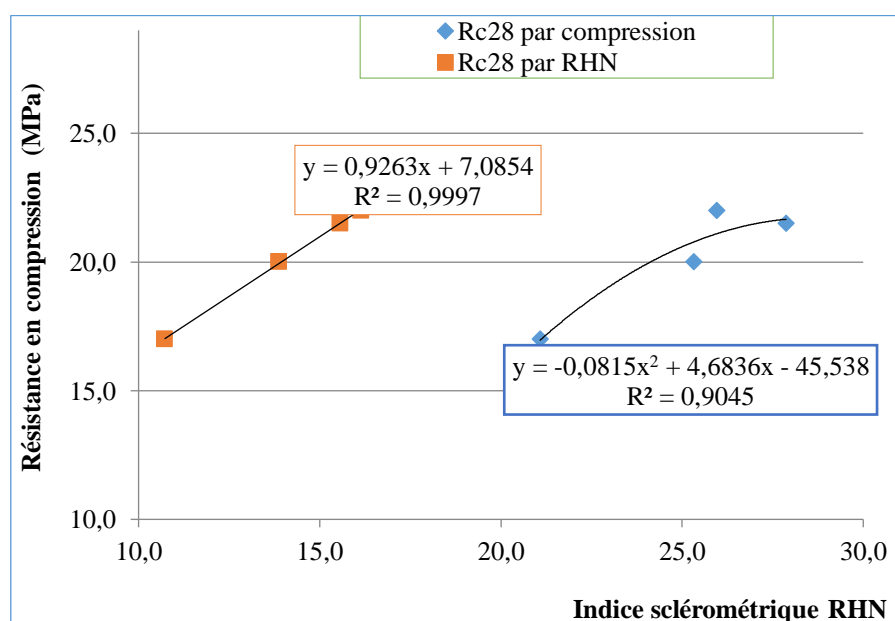


Figure IV.17: Corrélation indice RHN vs Rc28 par RHN et par compression des bétons de sable à base de CA

IV.3.6. Résistance par auscultation sonore (UPV)

Les résultats par la méthode de transmission directe à 28 jours (Figure IV.18), suivent la même tendance que la résistance à la compression, compte tenu de l'augmentation proportionnelle de la vitesse ultrasonique avec la résistance à la compression par écrasement. Ce qui est cohérent avec des travaux de recherche antérieurs (Memon et al., 2022; Zareei et al., 2018).

Un accroissement de la vitesse ultrasonique de 0.73% (optimum), a été observé pour CC8, qui a ensuite légèrement diminuée de 3605.8 m/s à 3597.1m/s avec l'augmentation du dosage CA. Les bétons CC16 et CC24 ont atteint respectivement 97.8% et 97.1% du témoin. Etant donné que l'ajout des agro-ciments au béton et au mortier au-delà du dosage optimal, a entraîné une diminution de la vitesse ultrasonique (Kolawole et al., 2021).

L'augmentation de la vitesse ultrasonique pour le béton avec 8% de CA pourrait résulter de l'effet filler de cette proportion, combiné à son effet pouzzolanique (Zareei et al., 2018). Ces facteurs impliquent un béton plus compact, avec moins de vides. Cependant, la réduction de la vitesse ultrasonique pour les bétons à base de CA, est due à l'augmentation de la porosité proportionnellement avec le dosage des cendres CA, car la propagation de la vitesse ultrasonique dans une matrice compacte est plus grande que dans un matériau poreux.

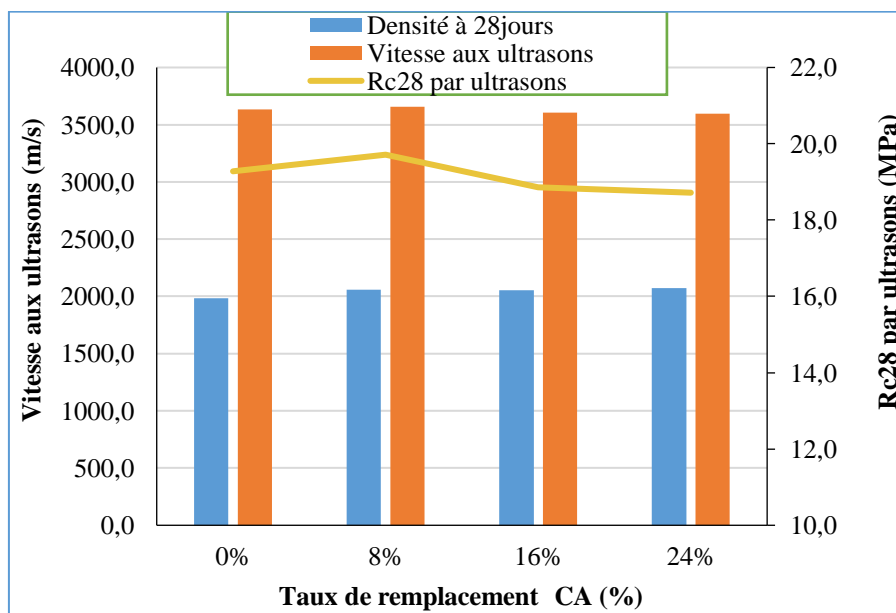


Figure IV.18: Effet % CA sur la vitesse aux ultrasons des bétons de sable à base de CA

Des résultats comparables ont été obtenus sur des bétons à base de matériaux pouzzolaniques (Arenas-Piedrahita et al., 2016; Pandey et Kumar, 2019; Zareei et al., 2018), qui ont montré que la vitesse ultrasonique traversant un solide est fortement influencé par la densité, les propriétés élastiques et les phases impliquées dans le matériau (Panzeria (2011)) tel qu'a été rapporté par Ullah et al., (2021). Ces constatations sont confirmées par les résultats de la résistance à la compression et le module d'élasticité (MOE) mentionnés.

Ainsi, compte tenu des résultats de l'UPV qui dépassent 3597m/s, l'utilisation de CA en tant qu'ajout cimentaire s'est avérée préserver la qualité du béton de sable pour tous les taux de remplacement considérés (Memon et al., 2022; Zareei et al., 2018); et la proportion de 8% a montré un effet bénéfique sur l'homogénéité et la compacité du béton de sable, étant donné que sa vitesse ultrasonique se situe dans la plage de 3660-4575m/s (Ullah et al., 2021) pour les bétons de bonne qualité.

Corrélation entre la résistance par la vitesse aux ultrasons et la résistance par compression

Toutefois, il existe des relations de corrélation entre les valeurs de la vitesse ultrasonique et les résistances à la compression par écrasement et par ultrasons, avec des coefficients de corrélation R de 0.901 et 1, respectivement (Figure IV.19 et Tableau IV.5), qui permettent de calculer les valeurs de résistance in-situ. De même, il y a une relation de corrélation polynomiale entre les valeurs de la vitesse ultrasonique UPV et l'indice sclérométrique RHN et entre leurs résistances respectives (Figures IV.20 et IV.21 ; Tableau IV.6) avec un coefficient de corrélation R de 0.821 et de 0.815, respectivement. Ces résultats sont en accord avec d'autres travaux recherches (Zareei et al., 2018).

Tableau IV.5: Formules de corrélation de l'UPV vs la résistance Rc28j, la résistance par UPV à 28jours des bétons de sable à base de cendres de canne.

| Corrélations | Formules | R ² |
|-----------------------------|-------------------------------------|----------------|
| UPV vs Résistance Rc28jours | $y = - 0.0016x^2 + 11.908x - 21736$ | 0.8126 |
| UPV vs Résistance par UPV | $y = 0.0162x - 39.611$ | 1 |

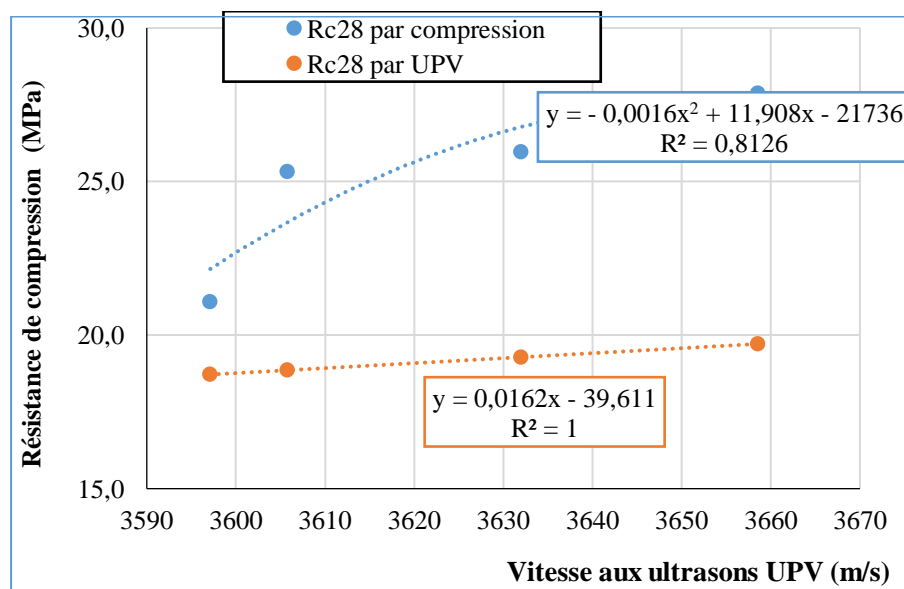


Figure IV.19: Corrélations de la vitesse aux ultrasons vs la résistance Rc28 des bétons de sable à base de CA

Tableau IV.6: Formules de corrélation de RHN vs UPV, la résistance par UPV à 28 jours des bétons de sable à base de cendres de canne.

| Corrélations | Formules | R ² |
|--------------------------------------|------------------------------------|----------------|
| RHN vs UPV | $y = 2.0789x^2 - 70.965x + 4201.7$ | 0.6747 |
| Résistance RHN vs Résistance par UPV | $y = 0.025x^2 - 0.5212x + 21.41$ | 0.6649 |

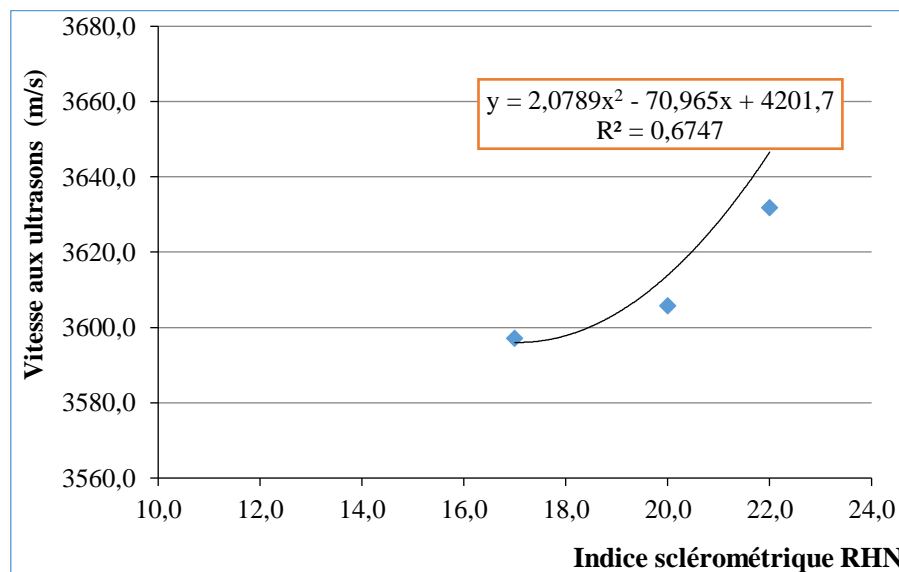


Figure IV.20: Corrélation de la vitesse aux ultrasons vs l'indice sclérométrique RHN des bétons de sable à base de CA

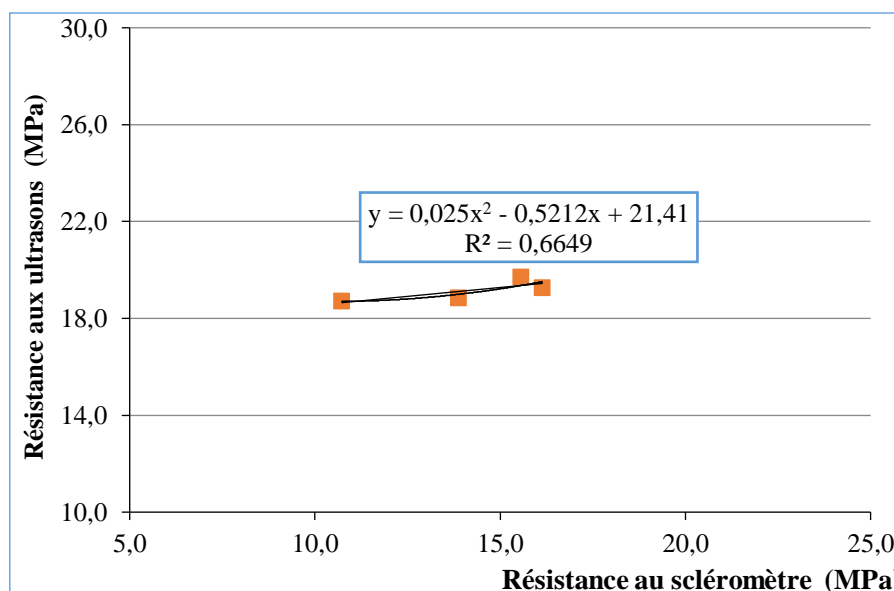


Figure IV.21: Corrélation de la résistance UPV vs la résistance RHN des bétons de sable à base de CA

IV.3.7. Méthode combinée

La méthode combinée (aux ultrasons et au scléromètre) est couramment utilisée pour estimer la résistance des structures en béton. Cette méthode implique la combinaison de deux tests non destructifs, la vitesse aux ultrasons et l'indice de rebondissement. Les résultats de

résistance obtenus par la méthode combinée diminuent avec l'augmentation de la proportion des cendres CA (Figure IV.22), et le meilleur résultat est observé pour le béton témoin. Les bétons de sable avec 8%, 16% et 24% de CA affichaient respectivement 97.9%, 85.2% et 65.5% de la résistance du témoin.

Les résultats obtenus peuvent être liés à la méthode de mesure de chaque technique par scléromètre et/ou par ultrasons. L'essai au scléromètre ne considère que la surface, tandis que l'essai aux ultrasons est basé sur l'effet de l'ensemble de l'échantillon. De plus, la méthode combinée réduit une partie de l'effet relatif de la classe et du dosage du ciment, des dimensions des granulats, de la teneur en humidité et même du rapport eau-ciment, entre autres, résultant de variations dans plusieurs propriétés du béton (Arenas-Piedrahita et al., 2016; Pandey et Kumar, 2019; Ullah et al., 2021). Par exemple, lorsque l'humidité augmente, la vitesse ultrasonique augmente également, tandis que la valeur de l'indice de rebondissement diminue, ce qui affecte les résultats de résistance combinée. Des études antérieures sur le béton incorporant des agro-ciments ont montré des résultats comparables, et le remplacement du ciment par plus de 10% d'ajout cimentaire peut réduire la résistance à la compression du béton et du mortier (Kolawole et al., 2021; Zareei et al., 2018). Ce qui est cohérent avec nos résultats.

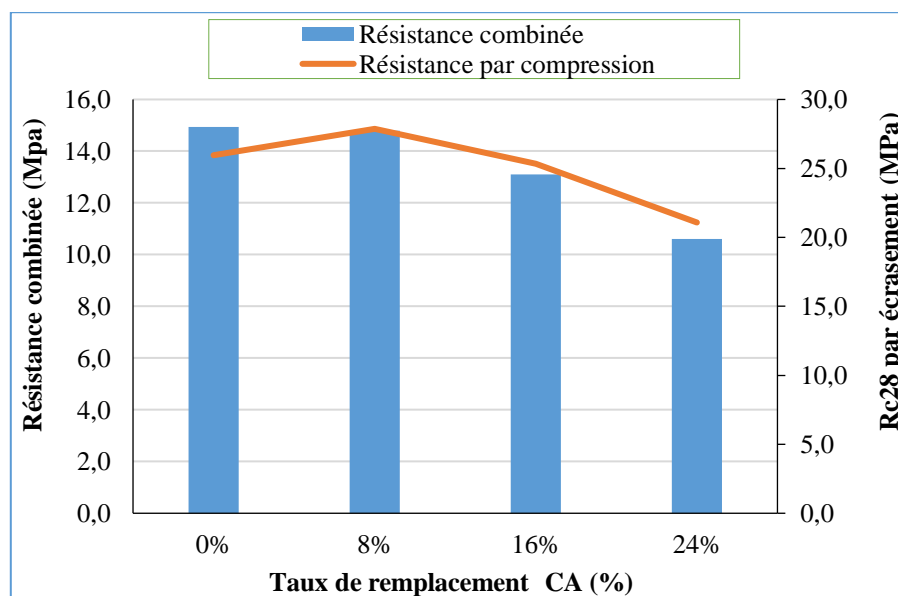


Figure IV.22: Effet % CA sur la résistance combinée des bétons de sable à base de CA

* Corrélation entre la résistance par la méthode combinée et la résistance par compression

Toutefois, il existe une relation de corrélation polynomiale entre la résistance par la méthode combinée et la résistance par compression, avec un facteur de corrélation R de 0.959 (Figure IV.23). Les équations de corrélation peuvent être utilisées pour l'estimation de la résistance caractéristique à la compression in-situ du béton de sable (Tableau IV.7).

Tableau IV.7: Formule de corrélation de la résistance par la méthode combinée vs la résistance de compression Rc28 des bétons de sable à base de cendres de canne.

| Corrélation | Formule | R ² |
|--|-------------------------------------|----------------|
| Résistance par la méthode combinée vs Rc28 | $y = -0.2323x^2 + 7.2803x - 30.036$ | 0.9203 |

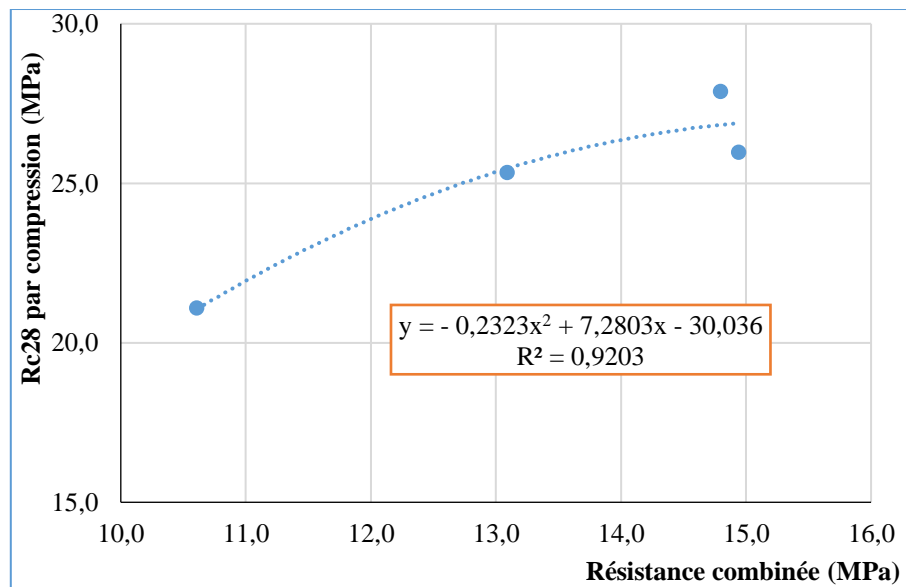


Figure IV.23: Corrélation de la résistance combinée vs la résistance Rc28 par écrasement

IV.4. Effet des cendres de canne sur la microstructure du béton de sable

IV.4.1. Analyse de la microstructure par DRX

Les Figures IV.24 - IV.26 montrent les diffractogrammes des bétons CC0 et CC8 avec des diagrammes DRX d'allure presque identiques. Les principales phases cristallines des hydrates produits pour les deux bétons étaient, le quartz (SiO_2); la calcite (CaCO_3); la portlandite ($\text{Ca}(\text{OH})_2$); la larnite (Ca_2SiO_4); l'ettringite ($\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12}\cdot 26\text{H}_2\text{O}$); la dolomite ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$); l'albite ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$); et le clinochlore Iib-2 ($\text{Mg}_5\text{Al}(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_8$).

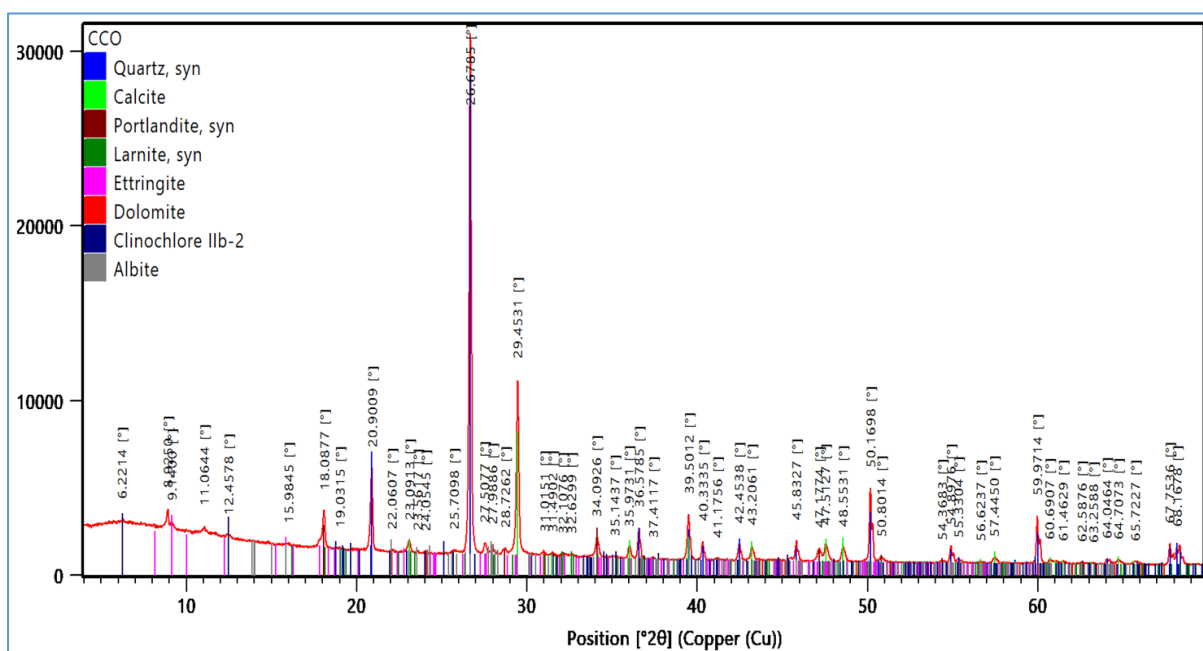


Figure IV.24: Schémas DRX du béton de sable témoin (CC0)

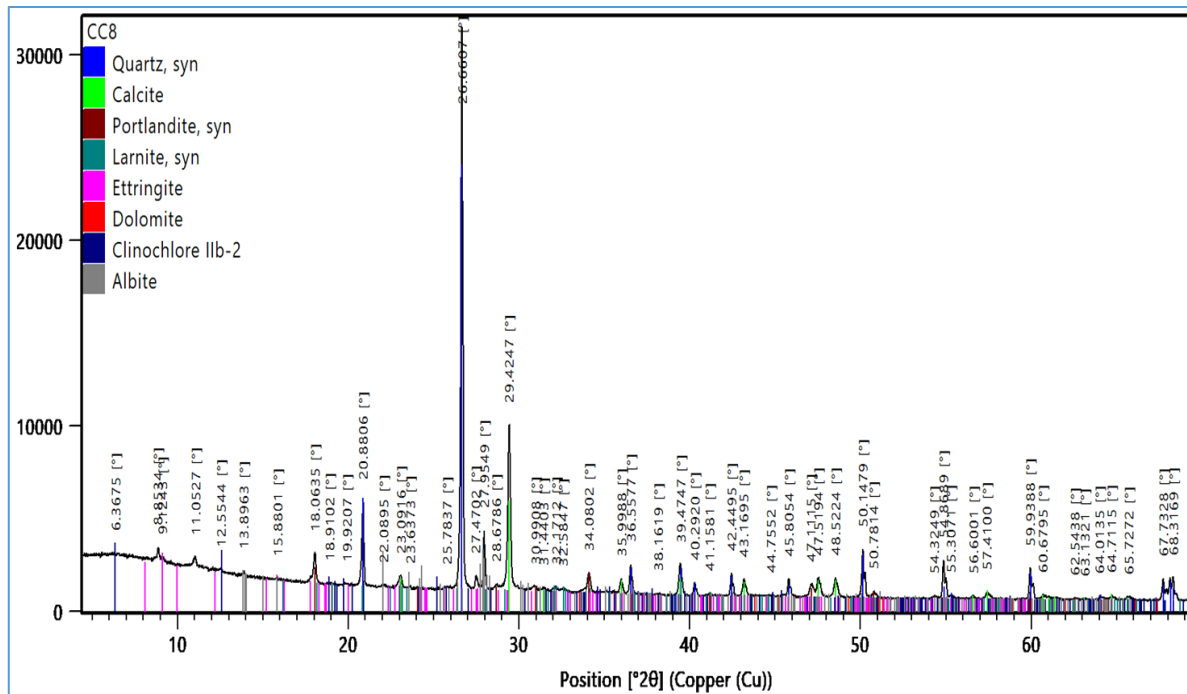


Figure IV.25: Schémas DRX du béton de sable à base d'ajout CA (CC8)

Les principaux pics de diffraction des phases se chevauchent significativement, avec une prédominance pour les pics de calcite et de quartz. Ce dernier présentait la plus grande intensité, qui se produisait à peu près au même 2-thêta (pics entre 20° et 30°) pour les deux échantillons. Étant donné que la structure du béton de sable est principalement basée sur le sable siliceux, et l'ajout CA a de la silice comme composé minéralogique principal.

L'intensité du pic de calcite se classait en deuxième position avec quantité plus élevée pour CC0 que pour CC8, car la présence de calcite et de dolomite indique que les bétons de sable contiennent des fillers calcaires, un composé essentiel des mélanges, en harmonie avec des études précédentes menées par Jamil et al., (2016).

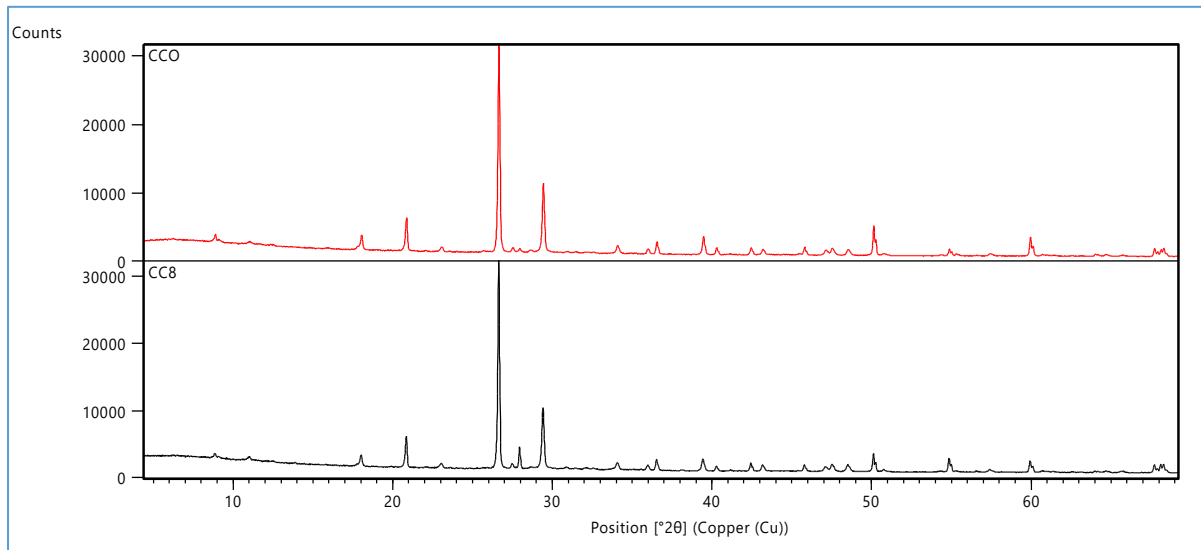
L'autre pic d'intensité caractérisant la portlandite, diminue avec l'augmentation du dosage de CA jusqu'à 8%, comme le montre la Figure IV.25 et la Figure IV.26; en raison de l'activité pouzzolanique du CA, même lente, elle consomme la portlandite libérée lors de l'hydratation du ciment, pour former des silicates de calcium hydratés supplémentaires (C-S-H), ce qui améliore les propriétés mécaniques et de durabilité des bétons de sable à partir de 28 jours et au-delà (Agwa et al., 2022). Toutefois, les pics d'intensité élevée de calcite par rapport à la portlandite indiquent qu'une certaine quantité de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ a été carbonatée et convertie en CaCO_3 en présence de CO_2 de l'atmosphère, entraînant ainsi un effet filler (Pandey et Kumar, 2019).

Une diminution des pics caractérisant l'ettringite a été également observée, leur hauteur étant plus faible pour la CC8 que pour le témoin. Bien que les pics affichés apparaissent en faibles proportions, la présence de la phase ettringite entraîne une réaction sulfatique qui pourrait endommager le béton car elle est expansive (Charitha et al., 2021).

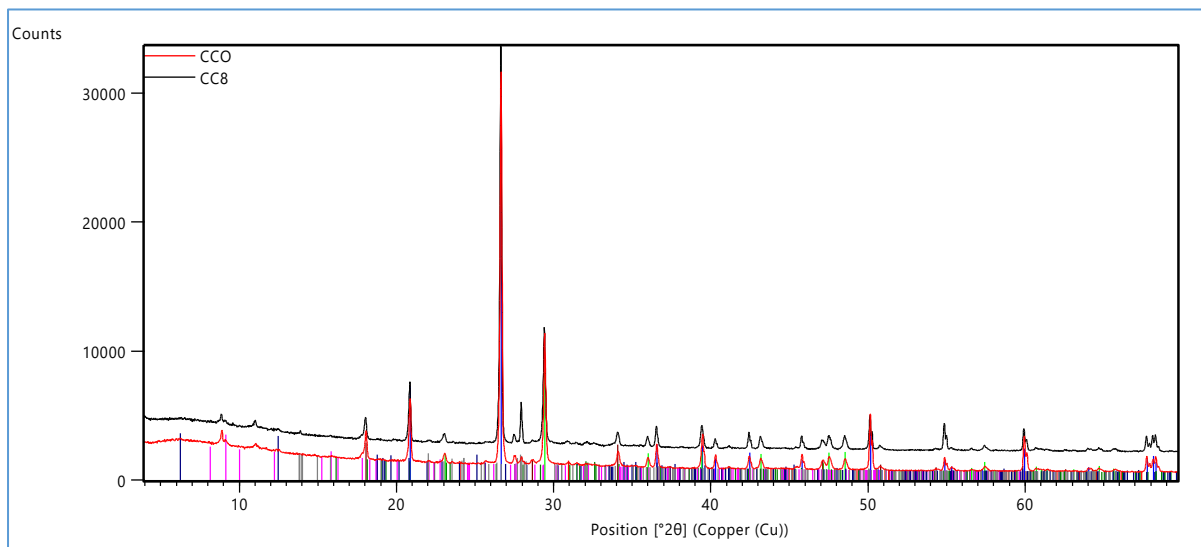
Les observations montrent la présence de la phase larnite sur les diffractogrammes correspondant au C_2S qui réagit pour produire le C-S-H; et l'apparition de deux nouvelles

phases, l'albite et le clinocllore. Ces deux phases cristallines sont le résultat des particules de ciment non hydratées (C_2S , C_3S et C_4AF).

La diminution des pics superposés pour toutes les phases exhibées signifie que les deux mélanges ont presque atteint la résistance maximale après 28 jours de cure sous eau.



(a)



(b)

Figure IV.26: (a) Diffractogrammes DRX du béton de sable témoin (CC0) et à base d'ajout (CC8); (b) Superposition de diffractogrammes DRX des bétons de sable CC0 et CC8

En conclusion, les diagrammes DRX des échantillons CC0 et CC8 indiquent que les phases cristallines identifiées, correspondent aux principaux composants du béton de sable. En outre, l'utilisation du dosage 8% CA entraîne le développement de C-S-H secondaire et la réduction de la portlandite et de l'ettringite. Ce qui confirme les résultats mécaniques obtenus et qui sont aussi compatibles avec les observations MEB/EDAX dans la section ci-dessous, qui révèle l'activité pouzzolanique de CA utilisé comme ajout cimentaire dans le béton de sable.

IV.4.2. Analyse de la microstructure par MEB-EDAX

Les micrographies MEB des mélanges CC0 et CC8 illustrées à différentes échelles (Figure IV.27 (a-d)), ont été utilisées en combinaison avec l'analyse EDAX (Figure IV.28 et IV.29 (a-e)) pour obtenir la composition élémentaire des phases des échantillons observés; et pour vérifier la présence de la réaction pouzzolanique dans le béton de sable à base de CA.

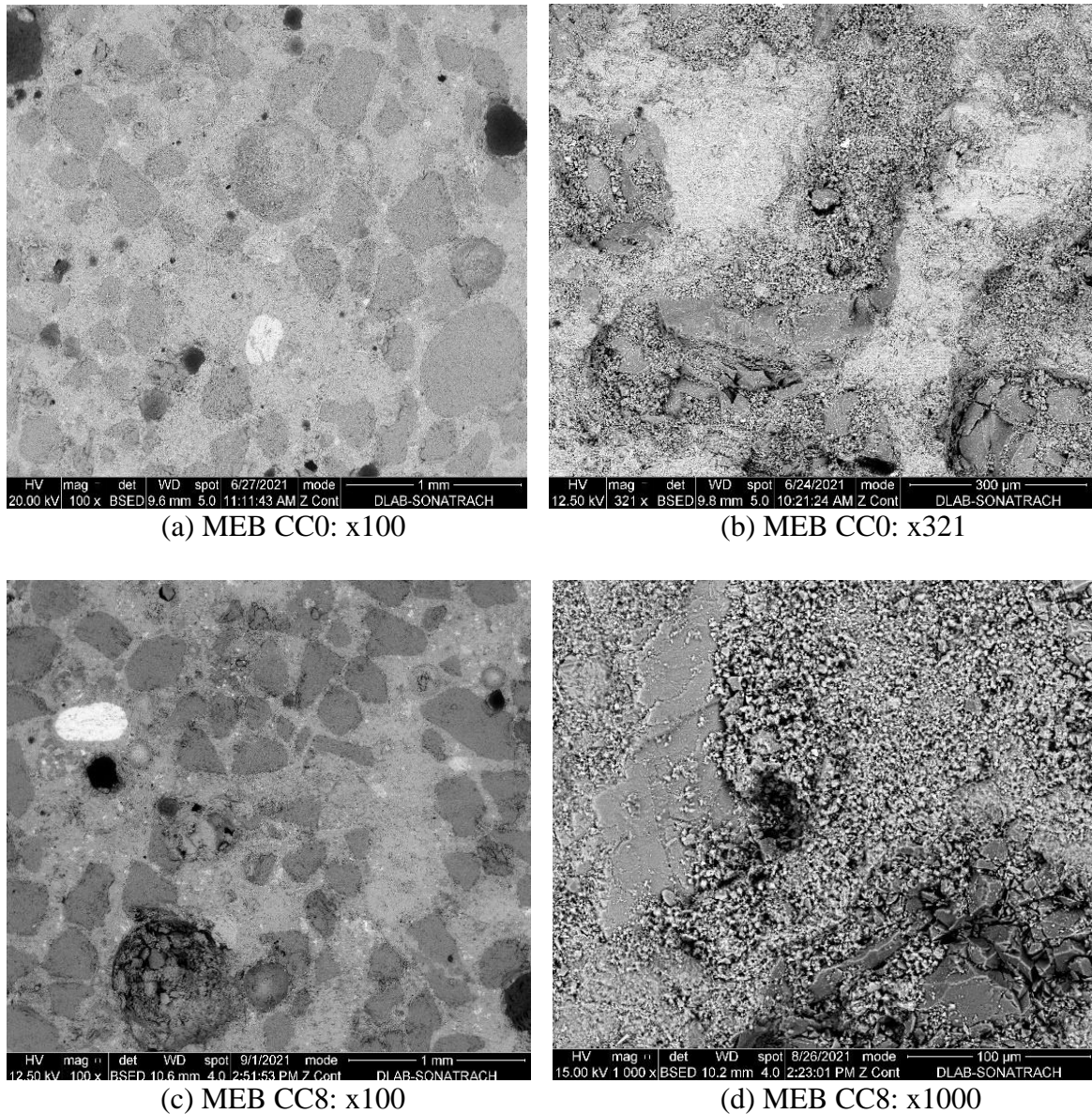


Figure IV.27 (a-d): Micrographies MEB des bétons de sable CC0 et CC8

Les deux microstructures des bétons de sable CC0 et CC8 ont montré des surfaces compactes avec des grains de sable irréguliers complètement fixés à la matrice, avec des particules de ciment non hydratées dispersées (Figure IV.27 (a, c)). Les surfaces observées sont très peu fissurées avec quelques pores plus ou moins arrondis, bien que le béton de sable soit plus poreux que le béton ordinaire. Les grands pores capillaires observés sont attribués à des bulles d'air piégées dans les échantillons de béton de sable, tandis que les petits vides représentent des micropores. Les micrographies illustrent également les principaux produits d'hydratation tels que la portlandite, le C-S-H et l'ettringite qui influent sur le développement

de la résistance du béton; et ces résultats sont en harmonie avec les travaux de recherche de Benaissa et al., (1993) et de Seyed et al., (2015).

Les images MEB ont montré une microstructure plus dense avec un gel C-S-H étalé et une liaison pâte-granulat plus forte pour le CC8 que pour le témoin CC0; puisque le taux d'hydratation du CC8 et les quantités de produits hydratés sont plus élevés. Ceci est attribué à la réaction pouzzolanique entre la silice et l'hydroxyde de calcium qui est indiquée dans le portlandite consommé et le C-S-H produit, comme résultat de l'activité pouzzolanique de CA. La structure des pores s'est affinée au fur et à mesure que les hydrates se chevauchaient, pour remplir partiellement ou totalement certains vides en combinaison avec l'effet filler de cette proportion (Figure IV.27 (d)), augmentant ainsi la densité et la résistance du béton de sable. Les observations au MEB ont confirmé les résultats des propriétés mécaniques et de durabilité obtenus; qui sont cohérentes avec les travaux de recherche de Sun et al., (2014); et Nguyen Van Tuan et al., (2011) qui ont également rapporté des résultats similaires pour le béton avec des cendres de balles de riz (RHA). En outre, des quantités plus importantes de grains de ciment non hydratés de petite et grande taille sont observées sur la surface du mélange CC8 par rapport au témoin (Figure IV.27 (c), Figure IV.29 (b, c)), car ils n'ont pas participé pleinement à la réaction pouzzolanique pour former le gel C-S-H secondaire, en raison de la taille des particules de CA plus rugueuses et de moindre finesse que le ciment.

Les compositions chimiques (EDAX) des bétons CC0 et CC8 (Figure IV.28 et Figure IV.29), varient selon les zones analysées. Les éléments O; Si; Ca; et Al, sont prédominants, avec la présence d'autres éléments chimiques tels que Fe; Mg; et K. De plus, le béton témoin CC0 contenait des traces des éléments Na; S; P; C et Cr, ce qui confirme les résultats de leur composition chimique. La teneur en C du béton témoin a contribué à une diminution de sa résistance.

Dans les zones (a, d), on observe que le mélange CC0 affiche une quantité plus élevée de Fe que les autres éléments Ca, AL, Mg, K présents (Figure IV.28 (a, d) spectres EDAX de CC0), et comparativement à celle du béton avec ajout CC8. Ce dernier, a montré une proportion réduite de Ca et des proportions plus importantes des éléments Si; K; et Mg que celles de CC0; avec un rapport Ca/Si inférieur à 1 (Figure IV.29 (a-e) spectres EDAX de CC8). Ainsi, le gel C-S-H obtenu peut être classé comme un hydrate de silicate de calcium à faible alcalinité, présentant une plus grande surface spécifique, plus de points de contact et une meilleure résistance mécanique (Wang et al., 2020).

A des taux de Ca/Si extrêmement bas de 0.8 (Figure IV.29 (a-d) spectres EDAX) et de 0.95 (Figure IV.29 (e) spectre EDAX) dans le mélange CC8, la formation d'hydrate de silicate de calcium (C-S-H) présentant une morphologie similaire à celle de l'herbe a été observée. Ces résultats sont cohérents avec les travaux de Kunchariyakun et al., (2015).

Selon les résultats de la microstructure, on peut conclure que le béton de sable avec 8% de CA présentait une intensité élevée pour les pics de diffraction du quartz (pics entre 20 et 30°), impliquant une activité pouzzolanique attendue de l'ajout de CA et confirmée par les observations MEB /EDAX. Les résultats ont également montré que le mélange CC8 est plus dense que le mélange témoin CC0 et aboutira non seulement à une amélioration des propriétés mécaniques après le développement de la microstructure, mais produira également un matériau de construction durable et économique.

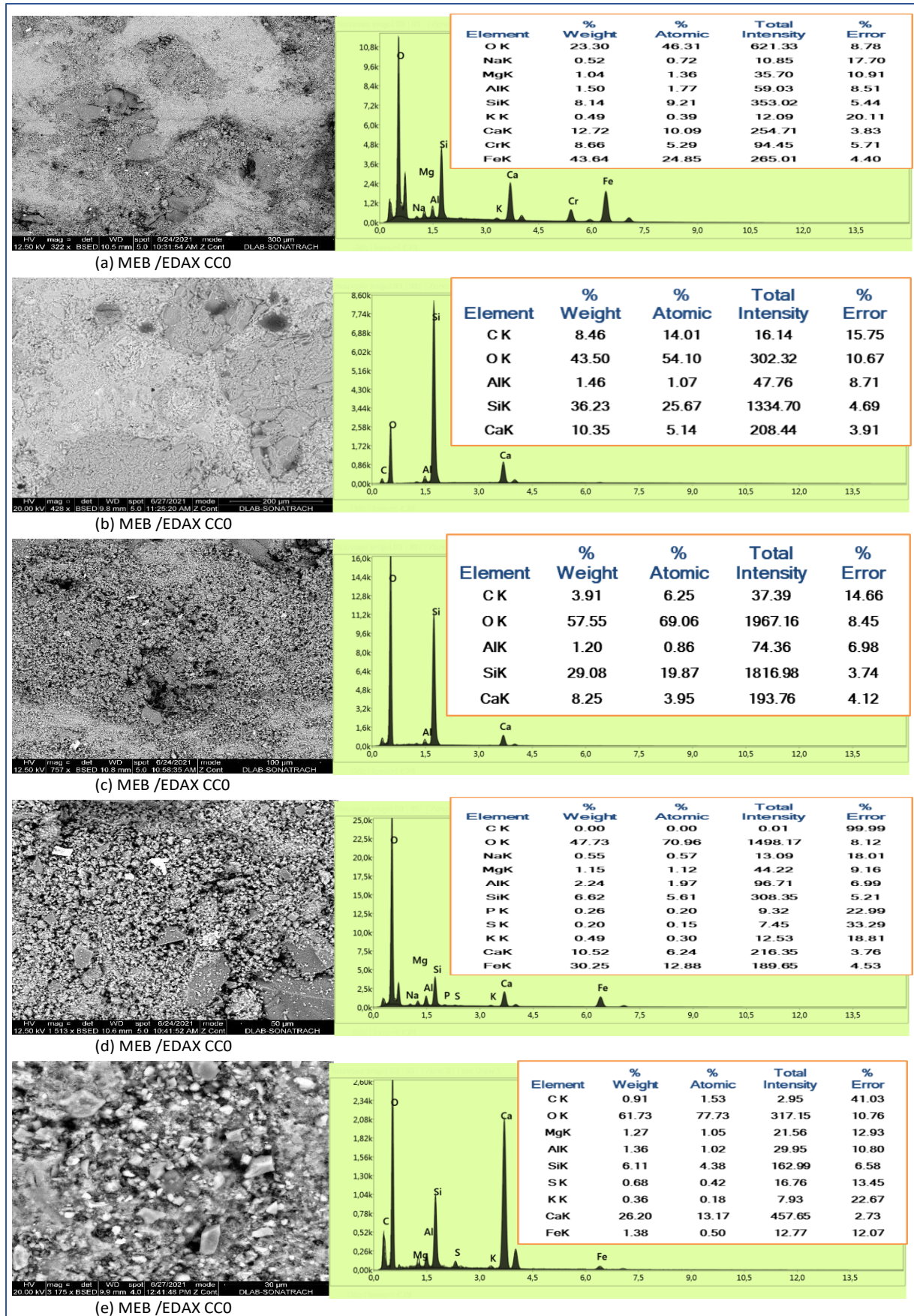


Figure IV.28: Micrographies MEB et les spectres EDAX du témoin CC0 : (a) x322, (b) x428, (c) x757, (d) x1513, (e) x3175

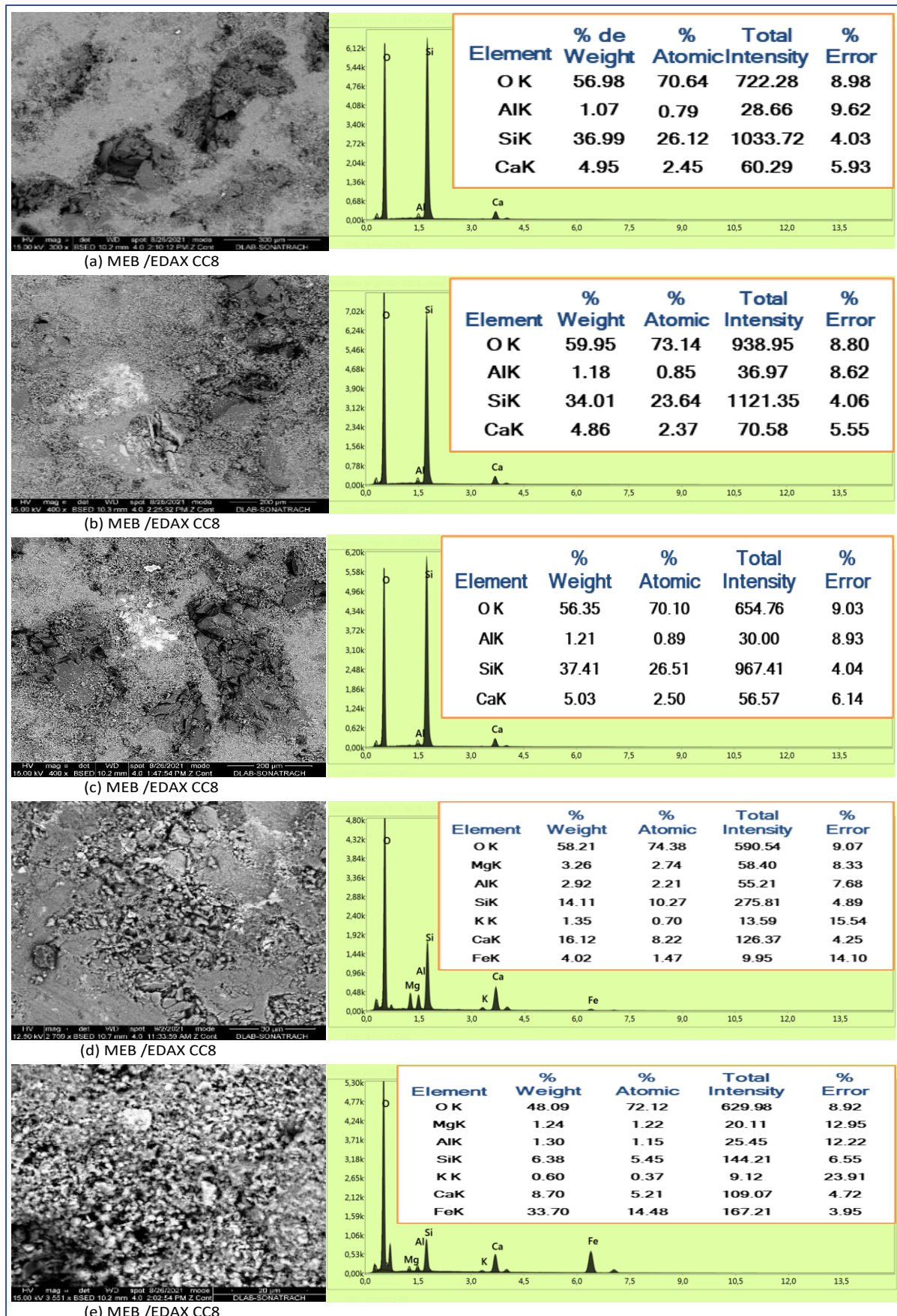


Figure IV.29: Micrographies MEB et les spectres EDAX du béton CC8 : (a) x300, (b) x400, (c) 2709, (d) x2709, (e) x3551

IV.5. Conclusions

La présente étude de recherche a exploré l'utilisation potentielle des cendres de déchets de canne non traitées, en remplacement partiel au ciment portland CEMI jusqu'à à taux de 24%; pour produire un béton de sable durable et écologique, en considérant les effets de l'ajout sur les caractéristiques physiques et les propriétés mécaniques ainsi que sur les caractéristiques de la microstructure. Sur la base des résultats des essais réalisés, les conclusions suivantes ont été tirées:

- Le taux 8-16% CA, permet d'obtenir une bonne ouvrabilité 23-19.5cm, ce qui présente un réel intérêt pour la facilité de mise en œuvre des bétons de sable dans les coffrages étroits; de formes spéciales; et à ferrailage dense.
- La proportion 8-24% CA augmente la densité et la teneur en air occlus du béton de sable. Néanmoins, les résultats obtenus demeurent satisfaisants.
- Les bétons de sable incorporant 0-24% CA, montrent des performances mécaniques intéressantes en compression et en flexion, et peuvent être utilisés dans la production des éléments en béton armé et pour des applications structurelles, car les résistances en compression R_{c28} et en traction par flexion R_{t28} excèdent 20MPa et 4MPa, respectivement.
- Le taux 8% (optimum) présente un gain de résistance en traction par flexion de 7.5% à 28 jours et de 13.4% à 120 jours. Pour la compression, on observe un gain de 5.3 %; 7.4%; 18.8% et 21.2% respectivement aux âges de 7; 28; 90 et 120 jours. L'effet positif de ce dosage à court terme, peut être exploité notamment dans la confection des matériaux de construction spécifiques qui nécessitent une résistance élevée au jeune âge et un décoffrage immédiat. Un gain de résistance en compression supplémentaire est affiché pour le mélange CC16 à long terme de 0.9% ; et 1.3% à 90; et 120jours.
- L'ajout CA augmente la densité du béton de sable, dont les valeurs sont en harmonie avec ceux des agro-ciments 1800-2100kg/m³ pour tous les âges, et sont même appropriés pour être utilisés comme béton de sable structurel; et le taux 8% affiche les valeurs optimales.
- L'incorporation de 0-24% CA améliore le module d'élasticité MOE du béton de sable avec ajout pour la plage de 23.6-24.9GPa, et cela correspond même à la marge d'utilisation habituelle pour le béton de sable structurel. La valeur la plus faible a été enregistrée par le témoin, et le taux de 8% CA a montré le meilleur résultat.
- L'ajout CA préserve la qualité du béton de sable pour tous les taux de remplacement considérés, compte tenu des résultats obtenus de la vitesse ultrasonique UPV (3597-3659m/s). La proportion de 8% a montré un accroissement de 0.7% (optimum), d'où son effet bénéfique sur l'homogénéité et la compacité du béton. Toutefois, la dureté d'impact et la résistance par la méthode combinée diminuent avec l'augmentation du dosage de CA, et les meilleurs résultats sont observés pour le témoin, ensuite pour le taux de 8% qui affichent des résistances de 96.4% et 99% de l'optimum de la résistance à la compression.
- Les analyses par DRX et MEB-EDAX ont révélé que la microstructure du béton de sable avec ajout était améliorée lorsque 8% de CA était incorporé. Elle était plus dense et plus compacte que le béton témoin. En raison de l'effet filler et pouzzolanique de cette

proportion, induisant un développement du gel C-S-H secondaire et une diminution de la quantité de portlandite. La phase ettringite a également diminué, ce qui justifie l'amélioration des propriétés mécaniques enregistrées.

Chapitre V

**Effet des cendres de canne sur les paramètres
de durabilité des bétons de sable**

V. Effet des cendres de canne sur les paramètres de durabilité

V.1. Introduction

Ce chapitre est dédié à la présentation et à l'analyse des résultats des essais entrepris, se référant aux paramètres de durabilité du béton de sable à base de cendres de canne, tels que l'absorption par immersion, l'absorption capillaire, la sorptivité, la pénétration des chlorures, ainsi que les résistances chimiques à l'acide chlorhydrique, sulfurique, nitrique, acétique, à l'hydroxyde de sodium, et aux sulfates de magnésium de même concentration (5%) lors d'une immersion totale pendant 120 jours.

L'objectif de ce chapitre est d'étudier le comportement du béton de sable à base de cendres de canne dans les différents environnements, et de déterminer l'effet des cendres de canne sur les paramètres de durabilité en interprétant les modifications engendrées.

V.2. Effet des cendres de canne sur les paramètres de durabilité des bétons de sable

V.2.1. Absorption d'eau par immersion

Les résultats présentés dans la Figure V.1 montrent que l'augmentation du dosage CA a induit une augmentation proportionnelle de l'absorption par immersion, et par conséquent de la porosité des bétons de sable à base de CA après 28 jours de cure.

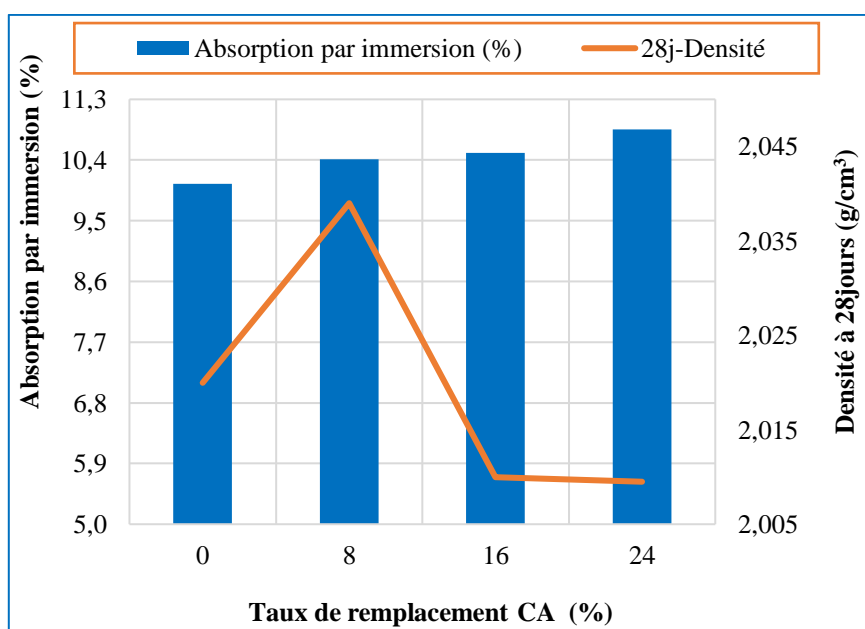


Figure V.1: Effet % des cendres CA sur l'absorption par immersion des bétons de sable

Un accroissement de 3.7%, 4.6%, et 8%, a été enregistré pour les mélanges CC8, CC16 et CC24, respectivement par rapport au béton témoin CC0 qui affiche la valeur la plus faible (10%); en dessous de laquelle la capacité d'absorption d'eau est notée de bonne qualité pour la plupart des bétons comme le souligne Neville (2011), car une absorption plus faible entraîne une plus grande compacité du béton. L'augmentation de l'absorption est attribuée à la distribution des particules de CA qui sont irrégulières et moins fines que le CEMI qui les empêche de remplir efficacement les pores de béton. De plus, la nature poreuse et hygroscopique de CA augmente la demande en eau proportionnellement au dosage de l'ajout;

et donc la pénétration de l'eau dans le béton. Ces résultats sont en bon accord avec les résultats de recherches antérieures (Agwa et al., 2022; Charitha et al., 2021; Chinnu et al., 2021; Garrett et al., 2020); notamment celle de Juenger et Siddique, (2015) qui ont montré qu'une porosité interne élevée augmente la demande en eau à travers son absorption par certaines cendres des agro-ciments à propriétés pouzzolaniques. Cependant, les travaux de recherche de Khatib (2008) ont indiqué une diminution de l'absorption avec l'augmentation de la durée de cure jusqu'à 28 jours, et que la prolongation de la période de cure entraînait une absorption inférieure; car plus d'eau est absorbée à un rythme plus élevé dans les premiers jours d'hydratation que dans les jours suivants. Selon les auteurs (Memon et al., 2022; Xu et al., 2018; Chindaprasirt et al., 2004), la réduction de l'absorption d'eau à long terme est due au raffinement des pores et au remplacement de la portlandite dans la matrice cimentaire par le gel C-S-H en raison de la réaction pouzzolanique de l'agro-ciment.

Ainsi, pour les bétons examinés, la diminution de la porosité est envisagée à long terme en raison des propriétés pouzzolaniques de CA. Par conséquent, les valeurs d'absorption d'eau des bétons de sable à base de CA ont été jugés acceptables (Benaissa et al., 1993), tout comme pour la plupart des matériaux de construction.

*Corrélation entre l'absorption par immersion et la densité

Une relation de corrélation polynomiale est affichée entre l'absorption par immersion et la densité (Figure V.2). Le coefficient de corrélation R vaut 0.928 (Tableau V.1).

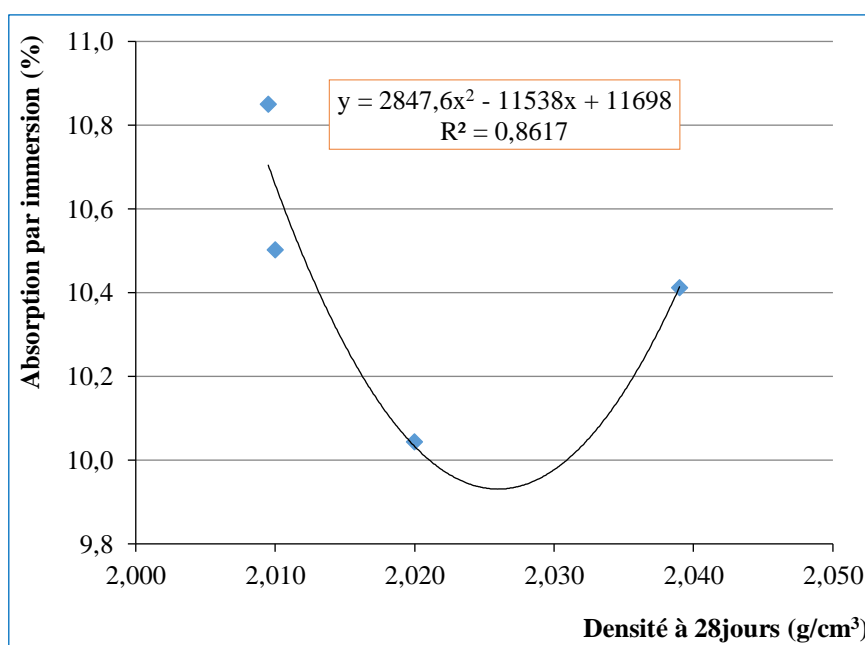


Figure V.2: Corrélation de l'absorption par immersion vs la densité à 28 jours.

Tableau V.1: Formule de corrélation de l'absorption par immersion et de la densité des bétons de sable à base de cendres de canne.

| Corrélation | Formule | R ² |
|--|----------------------------------|----------------|
| L'absorption par immersion vs la densité | $y = 2847.6x^2 - 11538x + 11698$ | 0.8617 |

V.2.2. Absorption capillaire et sorptivité

Les résultats indiqués dans les Figures V.3 et V.4 ont révélé que l'absorption capillaire augmente proportionnellement avec la durée d'immersion. Les bétons à base d'ajout CA présentent des niveaux d'absorption capillaire et de sorptivité plus élevés que ceux du béton témoin CC0 pour toutes les échéances étudiées.

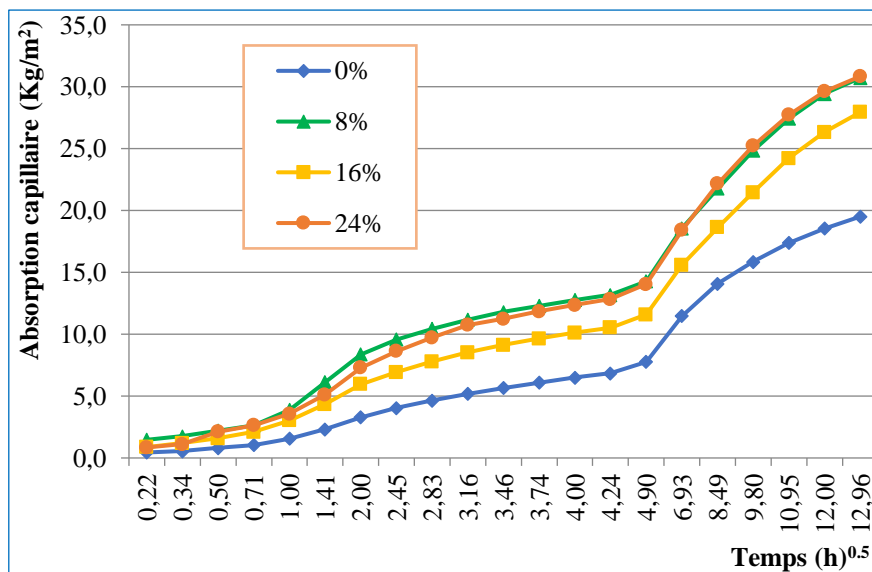


Figure V.3: Effet % des cendres de canne sur l'absorption capillaire des bétons de sable

L'augmentation de l'absorption capillaire est due à la rugosité des particules CA avec des bords et des surfaces irréguliers qui absorbent plus d'eau en raison de leur nature hygroscopique et de leur porosité comme la plupart des agro-ciments, qui induisent un volume plus élevé des pores capillaires. Cela entraîne également une augmentation de la sorptivité, qui peut ne pas dépendre de la connectivité des pores (Bahurudeen et al., 2015). Les courbes illustrées en fonction des échéances considérées, montrent une allure similaire qui est croissante pour l'absorption capillaire et décroissante pour la sorptivité, caractérisant trois types de comportement.

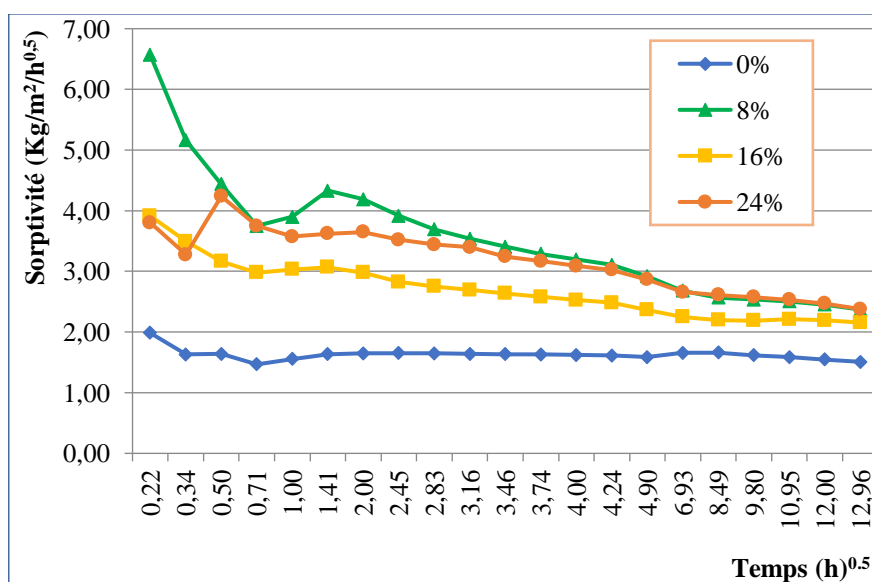


Figure V.4: Effet % des cendres de canne sur la sorptivité des bétons de sable

La phase d'absorption primaire dure de 0.05 heure (3 minutes) à 4 heures, qui illustre une variation linéaire de l'absorption capillaire et de la sorptivité de tous les bétons étudiés. La cinétique de la variation de la masse jusqu'à 4 heures d'essai est significative. Ceci est attribué au fait que le contact initial de la surface des bétons avec l'eau est affecté par la succion capillaire, associé à leur réseau poreux, ce qui détermine l'absorption rapide durant cette phase. C'est ainsi que le béton témoin affiche les valeurs les plus faibles de l'absorption capillaire et de la sorptivité, en raison de son réseau poreux plus fin, d'où une cinétique d'absorption plus faible par rapport au béton à base de CA. De plus, l'augmentation de la sorptivité est justifiée par l'effet de dilution pour les bétons à base de CA, ce qui retarde l'hydratation du ciment (Shatat, 2016). Certaines fissures confirmées par des observations au MEB contribuent également à l'augmentation de la sorptivité. Dans la phase secondaire, qui dure de 6 à 18 heures, les bétons présentent une variation légèrement incurvée, marquée par des pentes décroissantes qui dénotent une réduction du processus d'absorption, compte tenu du remplissage des grandes pores et du processus d'hydratation qui modifie la microstructure et affecte le réseau poreux, d'où un ralentissement du processus d'absorption. L'absorption capillaire des bétons à base de CA varie de 11.6 à 14.3 kg/m² par rapport à 7.8 kg/m² pour le béton témoin en 24 heures. Dans la troisième phase, qui dure de 24 à 168 heures, une variation presque linéaire avec des pentes décroissantes a été observée, indiquant un ralentissement du processus d'absorption en raison de sa cinétique réduite, provoquée par le processus d'absorption capillaire se produisant dans les pores les plus fins.

Ces résultats sont cohérents avec des études antérieures (Memon et al., 2022; Charitha et al., 2021; Pandey et Kumar, 2019), et la diminution de l'absorption et de la sorptivité des bétons à base d'ajout CA dans le temps, est due à sa réaction pouzzolanique plus lente pour le CA comme pour la plupart des agro-ciments. Cette réaction évolue dans le temps, notamment à long terme en renforçant la matrice par la formation de nouveaux hydrates induisant l'amélioration du réseau poreux par le l'affinement des pores (Shatat, 2016). Par conséquent, l'absorption d'eau devient plus difficile et plus lente. Ce résultat montre que CA a affecté la capacité d'absorption d'eau du béton de sable, en modifiant son réseau poreux, conduisant à des performances acceptables à long terme.

V.2.3. Pénétration des chlorures

Les résultats illustrés sur la Figure V.5, montrent une augmentation de la profondeur de pénétration avec la durée d'exposition aux chlorures pour tous les bétons examinés. De plus, il est observé que la variation du coefficient de diffusion des chlorures (D) suit une tendance similaire à celle de la profondeur de pénétration pour les mêmes périodes d'essai.

A 60 jours, le béton avec l'ajout de CA présente une profondeur de pénétration légèrement plus grande que le béton témoin (17.8mm); à l'exception du taux de 16% CA qui affiche la valeur la plus faible (16.9mm). A 120 jours, la profondeur de pénétration des taux de 8% et 24% diminue par rapport au témoin (27.1mm), avec des valeurs respectives de 22mm (minimum) et 25.3mm. Cependant, le taux de 16% affiche la valeur la plus élevée de 31.8mm.

La variation du coefficient de diffusion (D), montre que les taux de 8% et 24% affichent des valeurs plus basses que le témoin à 120 jours. Toutefois, les valeurs du coefficient D des bétons testés (Figure V.5 et Figure V.6), restent toutes inférieurs à 8×10^{-12} m²/s (Samimi et al., 2019), ce qui indique que les bétons avec ajout CA présente une bonne résistance à l'attaque par les chlorures. La variation de la profondeur de pénétration, pourrait être attribuée à une diffusion

différente des ions chlorures dans les pores, dont la mobilité et la vitesse de pénétration dépendent de leur taille et de leur distribution dans la matrice (Bahurudeen et al., 2015). De plus, la capacité de fixation des chlorures par le liant dépend de sa nature, principalement de la quantité d'aluminate C_3A (Kim et al., 2016). Selon la littérature (Aprianti et al., 2015; Bahurudeen et al., 2015; Charitha et al., 2021; Zerihun et al., 2022), le remplacement partiel du ciment par les agro-ciments contribuent à la diminution de la diffusion des ions chlorures dans les matériaux cimentaires.

Ainsi, la diminution de la profondeur de pénétration, peut être assignée à l'effet de la réaction pouzzolanique de l'ajout CA qui apparait à long terme par l'amélioration du réseau poreux, en raison de l'affinement des pores (Memon et al., 2022; Russo et al., 2020; Xu et al., 2018).

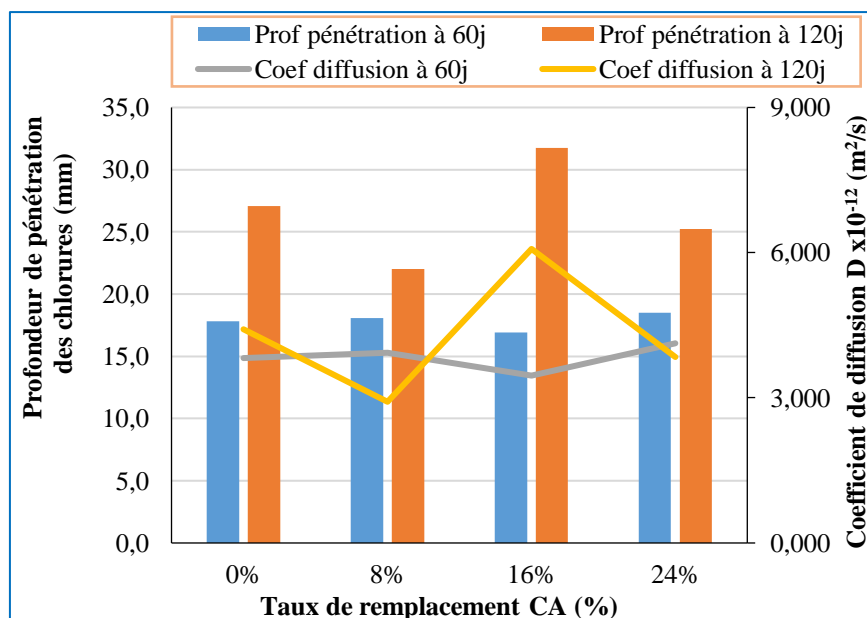


Figure V.5: Effet % des cendres de canne sur la profondeur de pénétration et le coefficient de diffusion apparent des chlorures

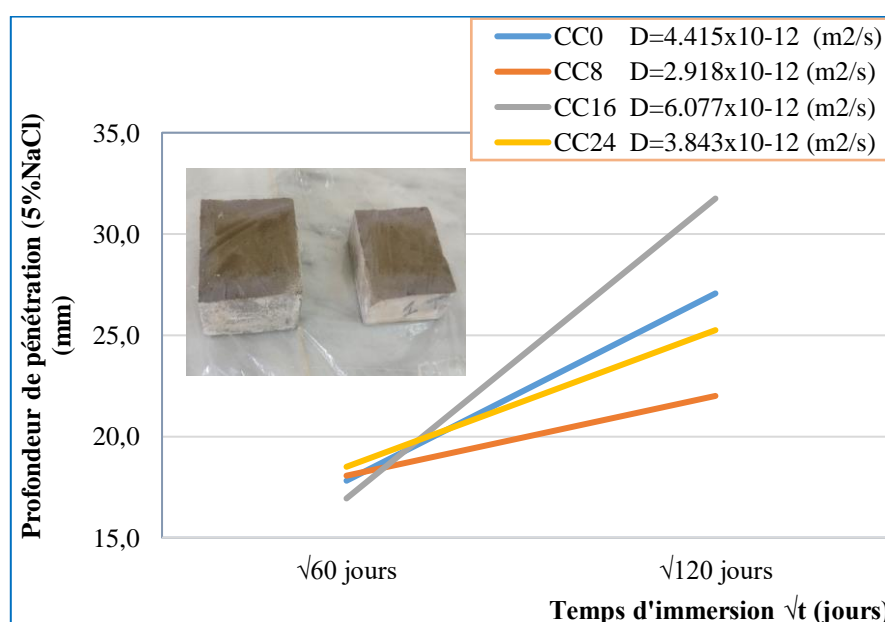


Figure V.6: Effet % des cendres de canne sur la profondeur de pénétration des chlorures en fonction de la racine carrée du temps d'immersion

D'après ces résultats, il est possible de déduire que le taux de substitution de 8% de CA a eu un impact positif en renforçant la résistance à la pénétration des ions chlorures (Samimi et al., 2019), induisant une diminution du taux de corrosion des barres d'acier. En effet, les mesures les plus réduites de la profondeur de pénétration (22mm) et du coefficient de diffusion ($2.918 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$) qui est nettement inférieur à $8 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$, ont été observées après une période d'exposition de 120 jours. D'où une performance en termes de durabilité dans un environnement agressif à base de chlorures.

*Corrélation entre le coefficient de diffusion des chlorures et la profondeur de pénétration

La Figure V.7 montre une relation de corrélation linéaire entre le coefficient de diffusion des chlorures et la profondeur de pénétration, avec un coefficient de corrélation R de 0.999 et de 0.998 correspondant respectivement à 60 jours et 120 jours d'immersion (Tableau V.2). Le coefficient de corrélation élevé $\sim 99.99\%$, indique une estimation presque fiable du coefficient de diffusion apparent des chlorures lié à la profondeur de pénétration.

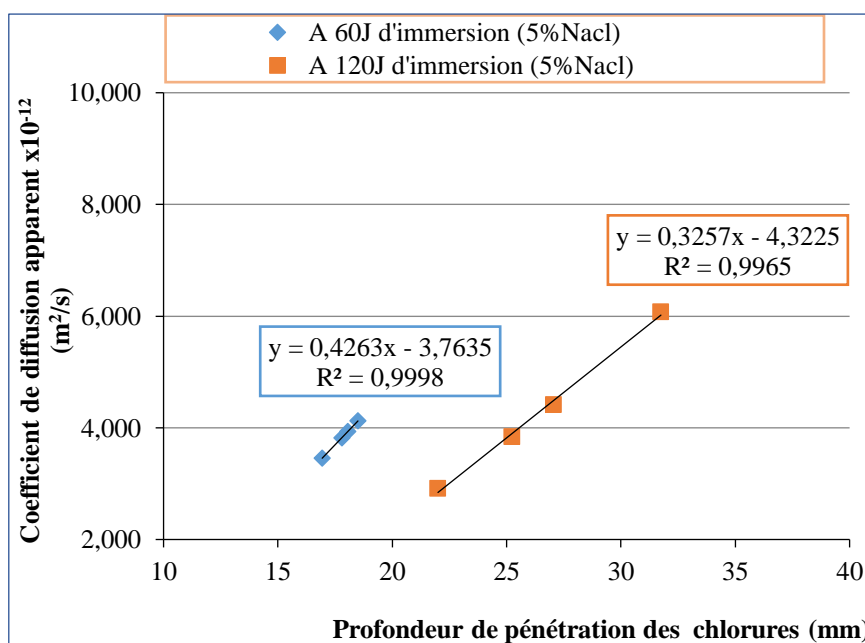


Figure V.7: Corrélations entre le coefficient de diffusion apparent vs la profondeur de pénétration des chlorures

Tableau V.2: Formules de corrélation du coefficient de diffusion des chlorures et de la profondeur de pénétration dans les bétons de sable à base de cendres de canne.

| Durée d'immersion dans NaCl | Formules | R^2 |
|-----------------------------|----------------------|--------|
| 60 jours | $y=0.4263x - 3.7635$ | 0.9998 |
| 120 jours | $y=0.3257x - 4.3225$ | 0.9965 |

* Evolution du gain de masse

La progression de la variation de la masse après 28, 60 et 120 jours d'exposition dans la solution d'attaque (Figure V.8 et Figure V.9), a montré une augmentation du gain masse avec le temps d'exposition pour tous les bétons testés.

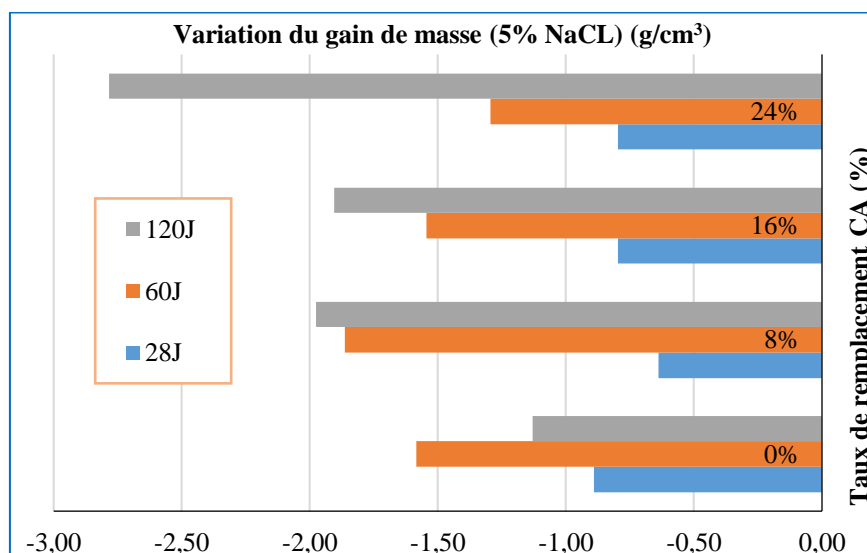


Figure V.8: Variation du gain de masse en fonction du % des cendres de canne

Un accroissement rapide du gain de masse est observé à 28 jours. Le béton témoin a enregistré la valeur la plus élevée du gain de masse avec un taux de 0.89%, tandis que les bétons à base d'ajout ont enregistré les valeurs les plus faibles. En raison de la faible densité de CA par rapport au CEMI et sa réaction pouzzolanique est lente et n'apparaît pas à 28 jours. L'augmentation du gain de masse est attribuée à un processus de diffusion rapide des chlorures dans les pores. Une augmentation continue du gain de masse est observée à 60 jours avec une cinétique lente, attribuée à la réaction pouzzolanique plus lente de CA qui apparaît à cet âge, mais qui est visible pour le mélange CC8 (dosage optimal), qui a montré une croissance rapide atteignant une valeur optimale de 1.86%, suite à la formation d'hydrates. A 120 jours, l'ajout CA a contribué à l'augmentation du gain de masse dans la plage de 1.13–2.78% comparativement au pourcentage le plus faible du témoin (1.13%). Et cela est dû au renforcement de la matrice par la formation du gel secondaire C-S-H (ayant une densité plus élevée), suite à la consommation de la portlandite (ayant une densité plus faible), d'où l'affinement des pores et l'amélioration du réseau poreux. Cette évolution est en accord avec les résultats de la pénétration des chlorures et de l'absorption capillaire.

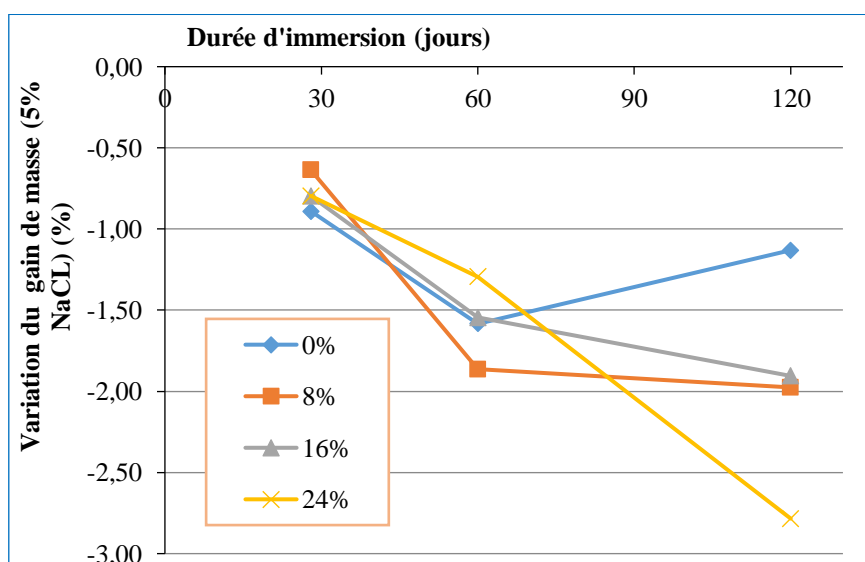


Figure V.9: Variation du gain de masse en fonction du temps d'immersion après 120 jours d'attaque par les chlorures

Ainsi, les résultats de la densité avant et après exposition (Figure V.10), sont significatifs pour le dosage de 8% de CA, qui a affiché les résultats optimaux à tous les âges. Toutefois, l'effet pozzolanique de CA qui se manifeste à long terme (120 jours), a entraîné une augmentation de la densité des bétons à base de CA dépassant celle du béton témoin.

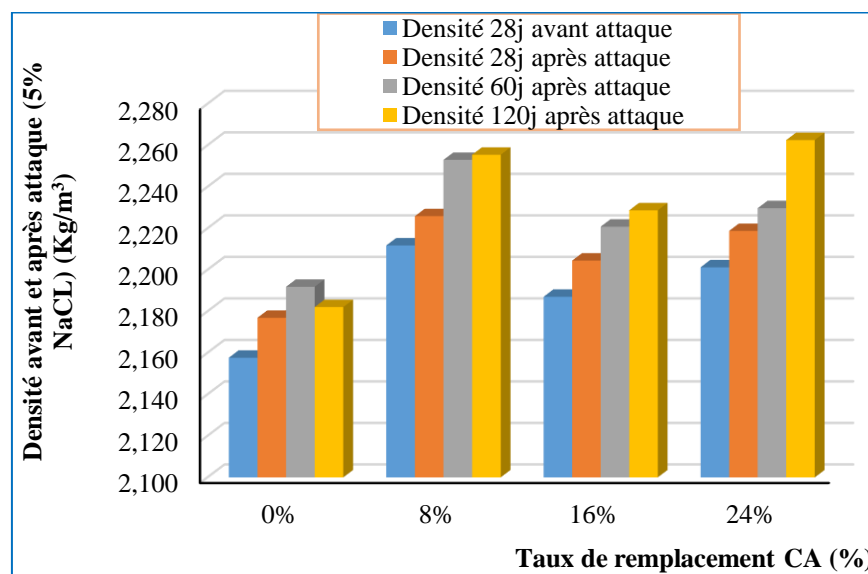


Figure V.10: Variation de la densité en fonction du % des cendres de canne après l'attaque par les chlorures

* Corrélation entre le gain de masse et la densité après 120 jours d'attaque

Une bonne corrélation polynomiale peut être observée entre le gain de masse et la densité des bétons avec ajout CA (Figure V.11), où les coefficients de corrélation R de 0.905, 0.844, et de 0.914 correspondent respectivement à l'immersion dans la solution de chlorure pendant 28, 60, et 120 jours (Tableau V.3).

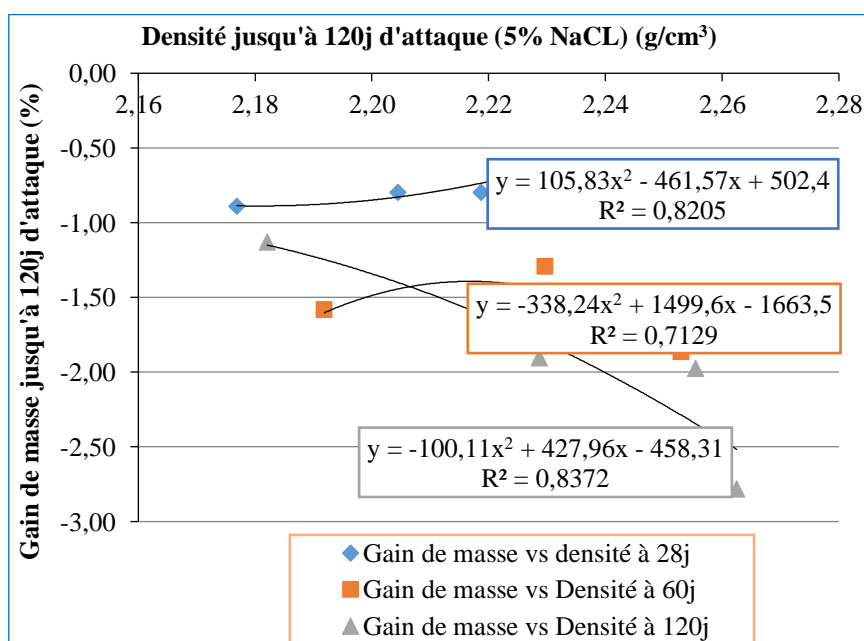


Figure V.11: Variation du gain de masse (5% NaCL) en fonction de la densité des bétons de sable à base de cendres de canne

Tableau V.3: Formules de corrélation du gain de masse (5% NaCL) et de la densité des bétons de sable à base de cendres de canne.

| Durée d'immersion dans 5%NaCL | Formules | R ² |
|-------------------------------|-------------------------------------|----------------|
| 28 jours | $y = 105.83x^2 - 461.57x + 502.4$ | 0.8205 |
| 60 jours | $y = -338.24x^2 + 1499.6x - 1663.5$ | 0.7129 |
| 120 jours | $y = -100.11x^2 + 427.96x - 458.31$ | 0.8372 |

V.2.4. Attaques chimiques

Nous procéderons à l'évaluation de l'effet de l'incorporation des cendres de canne comme ajout cimentaire sur les propriétés de durabilité du béton de sable en termes de résistance face aux divers milieux agressifs suivants: les acides (HCL, H₂SO₄, HNO₃ et CH₃COOH), les bases (NaOH) et les sulfates de magnésium (MgSO₄). Cette évaluation sera basée sur une observation visuelle des spécimens, une analyse des variations (perte ou gain) de masse et de volume des éprouvettes immergés dans les diverses solutions d'attaque à 5% de concentration, pendant la période d'exposition de 120 jours.

V.2.4.1. Effet de l'acide chlorhydrique HCL

a. Examen visuel

Tous les spécimens immergés dans une solution d'acide 5%HCL pendant 120 jours, ont conservé leur forme, demeurant pratiquement inchangée jusqu'à 28 jours d'exposition, tout en présentant une surface uniforme et sans fissures. Cependant, après cette période, jusqu'à 120 jours, des modifications de leur forme ont été observées, indiquant des signes d'érosion, principalement constatés sur les angles, les arêtes et sur les surfaces externes. Ces altérations étaient légères au début de l'exposition, mais sont devenues ultérieurement, significatives en fonction du temps. Le dépôt ainsi que l'aspect des bétons affectés par l'acide HCL (Figure V.26 et Figure V.27), résultant de la précipitation du chlorure de calcium à la surface du béton (Benosman et al., 2011), montraient une teinte brun rouille, affectant également la couleur de la solution, qui a présenté une légère décoloration, à la fois blanche et jaunée au début de l'exposition, pour devenir légèrement jaunâtre après 120 jours. Une observation spécifique concernant l'agression par l'acide HCL est la détection de bandes brunâtres à la surface des spécimens, résultant probablement de la présence d'hydroxyde ferrique (Goyal et al., 2009). De plus, la réaction entre le fer contenu dans le ciment et le chlorure présent dans l'acide chlorhydrique produit du chlorure ferrique (Memon et al., 2022, Goyal et al., 2009). Aussi, l'exposition à l'acide n'affecte que les surfaces externes du béton de sable, tandis que les couches internes restent inchangées (Ammari et al., 2020). La couche externe est complètement enlevée en fonction de la durée d'exposition. En raison de ce détachement de la surface, les spécimens subissent une perte de masse importante (Goyal et al., 2009).

b. Perte de masse

L'évolution de la perte de masse des bétons de sable à base de cendres de canne (CA), exposés à une solution à 5% d'acide HCL, pour les échéances de 3, 7, 14, 21, 28, 56, 90 et 120 jours (Figure V.12), montre une perte de masse plus élevée pour les bétons incorporant les cendres CA par rapport au béton témoin, sauf pour le mélange CC8 qui a affiché la perte de masse la plus faible entre 90 et 120 jours.

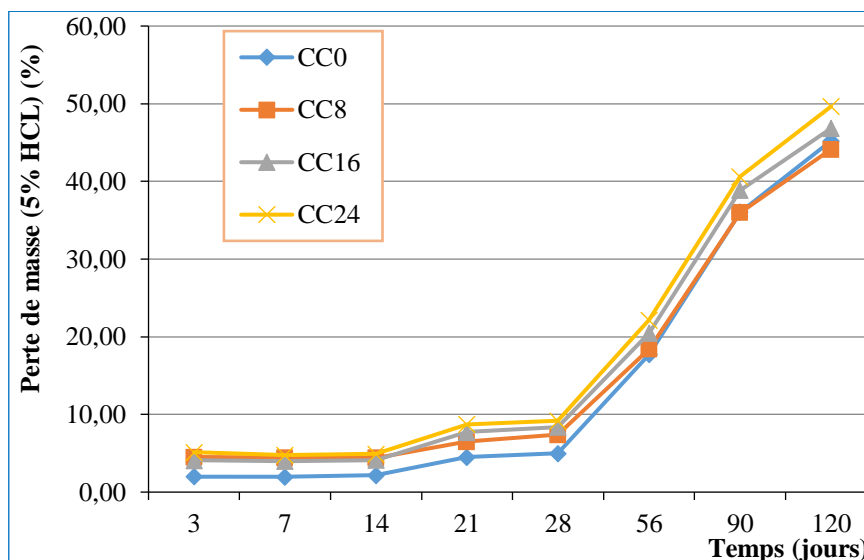


Figure V.12: Perte de masse des bétons de sable à base de cendres de canne (CA) en fonction de la période d'immersion dans 5% HCL

Au jeune âge (7 jours), une légère diminution de la perte de masse est observée pour l'ensemble des bétons étudiés, pouvant être attribuée à l'eau chimiquement combinée ou à l'eau adsorbée (qui n'est pas éliminée à 105–110°C) suite à l'action acide, et qui contribue ainsi à ce gain initial de masse, comme l'ont indiqué Goyal et al. (2009). Ensuite, une augmentation progressive de la perte de masse en fonction de la durée d'exposition, a été observée, devenant proportionnelle à la teneur en CA entre 21 et 120 jours, en raison de la lixiviation continue des produits de réaction sous l'effet de l'action corrosive de l'acide HCL. Le niveau de dégradation des spécimens est demeuré insignifiant et difficile à percevoir visuellement durant les trois premiers jours d'exposition, jusqu'au 14^{ème} jour. Néanmoins, une légère augmentation de la dégradation a été notée entre 21 et 28 jours, devenant significative à partir de 56 jusqu'à 120 jours.

L'augmentation de la perte de masse, qui se révèle plus élevée pour les bétons contenant des cendres CA par rapport au béton témoin, est attribuée à la forte absorption d'eau et au volume important de vides perméables du béton à base d'agro-ciment par rapport au béton témoin sans ajout. De plus, les caractéristiques hygroscopiques et la porosité des particules de l'ajout, ont permis aux ions HCL de pénétrer dans le béton, entraînant ainsi une dissolution accrue de l'hydroxyde de calcium ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) et une décalcification des silicates de calcium hydratés (C-S-H). Il a été observé qu'en dépit de la réduction de la quantité de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ suite à l'incorporation des ajouts cimentaires aux propriétés pouzzolaniques, les ions HCL ont la capacité de réagir avec d'autres composés de calcium dans la pâte de ciment. Aussi, la présence de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ dans les particules de l'ancienne matrice cimentaire, réagit avec les ions HCL, induisant une perte de masse supplémentaire (Alnahhal et al., 2018).

Au jeune âge, jusqu'au 56^{ème} jour d'exposition, la valeur minimale de la perte de masse a été affichée par le béton témoin CC0, s'élevant à 17.72% à 56 jours. Néanmoins, à long terme (de 90 à 120 jours), le mélange CC8 a montré la meilleure résistance en perdant 44.13% de sa masse après 120 jours d'exposition. Cela pourrait être dû à la réaction pouzzolanique et aux propriétés chimiques générées par cette proportion de CA, qui se caractérise par sa lenteur en comparaison avec l'hydratation du C_3S , et qui apparaît à long terme en améliorant la qualité du béton CC8, en interagissant avec $\text{Ca}(\text{OH})_2$ pour produire davantage de gel C-S-H, induisant la

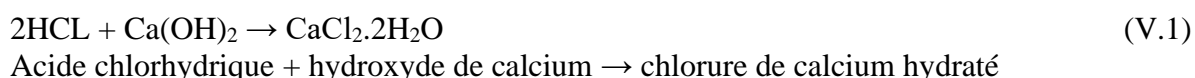
réduction des pores capillaires, comme a été mentionné par Alnahhal et al., (2018). Néanmoins, Tipraj et Shanmugapriya (2023) attribue cette amélioration à une faible teneur en calcium et à un meilleur lien aluminosilicate. Le mélange témoin qui a perdu 45.22% de sa masse s'est classé en deuxième position, suivi du mélange CC16 avec une valeur de 46.83%. Tandis que le mélange CC24 a enregistré la plus grande perte de masse pour toutes les échéances étudiées, atteignant 49.65% à 120 jours.

Des résultats comparables ont été constatés lors de l'exposition du béton à base d'agrociments à l'acide HCL. Certains auteurs ont montré que l'utilisation de cendres de balles de riz (RHA) en remplacement du ciment CEM a eu un impact positif sur la résistance à l'agression par l'acide HCL, grâce à l'amélioration de la densité et de l'imperméabilité du béton (Alnahhal et al., 2018; Kannan et Ganesan, 2014). Le même effet a été constaté sur l'utilisation de 30% de cendres de palmier à huile (POFA) comme ajout cimentaire, résultant en un béton plus dense, moins susceptible à l'attaque de l'acide HCL, réduisant ainsi le processus de détérioration (Alnahhal et al., 2018). Memon et al., (2022), ont reporté que le béton incorporant un taux de 0–40% de cendres de bagasse de canne (SCBA) a présenté une meilleure résistance à l'acide chlorhydrique et à l'acide sulfurique.

c. Action de l'acide HCL

Les études de recherche présentent généralement la perte totale de la matière causée par l'action acide, comprenant la dissolution, la précipitation, le transfert de la masse dans la solution ainsi qu'à l'intérieur du solide poreux. Plusieurs facteurs influencent la résistance chimique aux solutions acides, parmi lesquels figurent la concentration et le pH de la solution agressive, la mobilité de cette solution, l'augmentation de l'absorption d'eau dans les mélanges de béton, le rapport eau/ciment, le type de ciment ainsi que son processus d'hydratation et les additions cimentaires (Alnahhal et al., 2018). Selon Gay et al., (2016), tous ces facteurs interagissent entre eux, affectant ainsi la résistance et la rigidité du matériau.

Le mécanisme d'attaque par l'acide HCL peut être décrit selon Alnahhal et al. (2018), par la neutralisation progressive de la nature alcaline de la matrice cimentaire, à travers la décomposition des produits d'hydratation, tels que l'hydroxyde de calcium ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) et les silicates de calcium hydratés (C–S–H), formant ainsi du sel de chlorure de calcium (CaCl_2) hautement soluble et de l'eau, comme illustré dans les équations (V.1) et (V.2). La structure des bétons peut être affaiblie en éliminant ce composé de la pâte et les sels insolubles, ainsi que les hydrogels amorphes (hydroxyde de fer) qui restent dans la couche corrodée. La décalcification du C–S–H pourrait se poursuivre après l'épuisement de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, ainsi, la décomposition de la matrice cimentaire entraîne une augmentation de la porosité et de la perméabilité du béton, ce qui conduit à une diminution de sa résistance et de sa masse. Benosman et al. (2011), ont montré que l'agression par l'acide HCL est caractérisée par la formation d'une structure en couches, qui peut être divisée en trois zones principales; la zone non endommagée, la zone de mélange d'hydroxyde ou anneau brun qui est formé par le développement des sels non dissous, probablement causé par la présence d'hydroxyde ferrique (Goyal et al., 2009), et la zone affectée, qui au départ selon Alnahhal et al. (2018), est composée d'une couche fragile qui s'épaissit progressivement durant l'attaque. La présence de l'ancien mortier de ciment facilite la pénétration des ions HCL, entraînant une détérioration supplémentaire du béton sain.





Acide chlorhydrique + gel C-S-H → chlorure de calcium

De plus, les fillers calcaires, un composant du béton de sable, favorise la réaction entre les carbonates de calcium (CaCO_3) et l'acide HCL suite à la réduction de la proportion du CaO dans la matrice cimentaire, entraînant la formation du sel CaCL_2 dans les pores du béton (équation V.3), ce qui entraîne une perte de masse significative et la détérioration des spécimens, comme a été indiqué par Ammari et al. (2020).



Acide chlorhydrique + carbonate de calcium → chlorure de calcium

Ainsi, au jeune âge et à moyen terme, le béton témoin CC0 montre une meilleure résistance en termes de perte de masse à l'agression par l'acide HCL par rapport aux bétons de sable contenant 8–24% de cendres de canne. Tandis qu'à long terme, le mélange CC8 se révèle être le plus performant, en améliorant la résistance face à l'action acide de 2.41% à 120 jours. Le béton incorporant 24% de CA s'avère être le plus vulnérable à cette agression, avec une augmentation de la perte de masse de 9.79% à 120 jours par rapport au béton témoin, suivi du mélange CC16 avec une hausse de 3.56%.

d. Variation de volume

La Figure V.13 illustre les résultats de la variation de volume des bétons de sable à base de cendres de canne, immergés dans une solution d'acide HCL pendant une période de 28 et 120 jours d'agression.

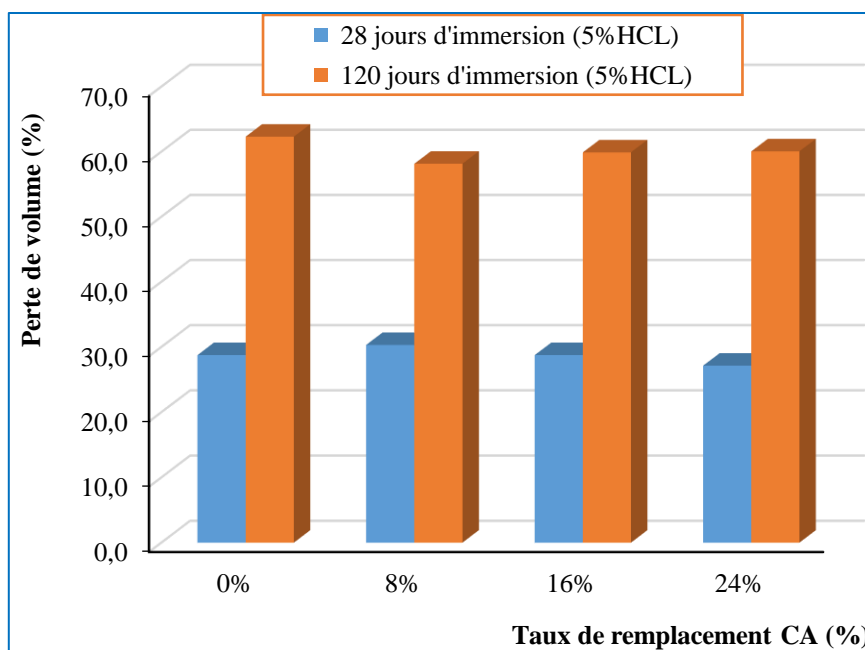


Figure V.13: Perte de volume des bétons de sable à base de cendres de canne à 28 jours et 120 jours d'immersion dans 5% HCl

A 28 jours d'exposition, les bétons contenant 0%, 8%, 16% et 24% de cendres CA ont perdu respectivement 28.8%, 30.3%, 28.8% et 27.1% de leur volume sous l'action acide. Le mélange

CC8 a enregistré la plus grande perte de volume, en marquant une diminution de 5.4% par rapport au témoin. Tandis que le mélange CC24 a inscrit la plus faible perte de volume, en notant une amélioration de 5.6%. Les pertes de volume pour les mélanges CC16 et le témoin CC0 sont comparables. La variation de la perte de volume pourrait être attribuée à une diffusion différente des ions acide dans les pores, dont la mobilité et la vitesse de pénétration dépendent de leur taille et de leur distribution dans la matrice. Aussi, l'action de l'acide sur les matériaux cimentaires dépend de la nature du liant, des taux de substitution du ciment qui influent sur le degré de réactivité de l'ajout, et des niveaux d'absorption capillaire. Selon la littérature, l'utilisation des agro-ciments contribue à l'augmentation de la résistance des bétons face à l'attaque acide (Pandey et Kumar, 2022; Memon et al., 2022).

Après une période d'exposition de 120 jours, la diminution du volume des bétons incorporant 8–24% des cendres CA, augmente proportionnellement à leur dosage. Les bétons CC8, CC16 et CC24 ont perdu 58.1%, 59.9% et 60% de leur volume, respectivement par rapport au béton témoin, qui a affiché la valeur la plus élevée de 62.3%. Cela peut être attribué à l'effet de la réaction pouzzolanique de l'ajout CA, comparable à celle constatée pour la majorité des agro-ciments, tels que les cendres de balle de riz (RHA) et les cendres de palmier à huile (POFA), dont les effets se manifestent à long terme par un affinement des pores, résultant d'une teneur élevée en SiO_2 , favorisant ainsi la formation d'un gel C–S–H secondaire capable de combler les vides existants et d'optimiser la structure des pores. D'où, une cinétique d'absorption plus faible par rapport au béton témoin (Alnahhal et al., 2018; Mohammad hosseini et al., 2021), ce qui impacte positivement le volume des bétons.

C'est ainsi que l'ajout de 8-24% CA, a une action bénéfique sur la perte de volume du béton de sable exposé à l'acide HCL, en montrant une amélioration de 6.7%; 3.9%; et 3.6%, respectivement, pour les bétons CC8; CC16; et CC24 après 120 jours d'exposition.

En conséquence, la proportion de 8% de cendres de canne, améliore la résistance des bétons de sable en termes de perte de masse et de volume à 120 jours d'exposition à 5% d'acide HCL.

V.2.4.2. Effet de l'acide sulfurique H_2SO_4

a. Examen visuel

Tous les spécimens de béton de sable immergés dans la solution à 5% d'acide sulfurique (H_2SO_4), ont montré une dégradation progressive et accélérée en fonction de la durée d'exposition, induisant une grande érosion des bétons, qui se distinguaient par une apparence blanchâtre, une surface rugueuse et une perte considérable de volume. Après 28 jours, et jusqu'à 120 jours d'attaque acide, des écaillages étaient nettement visibles et une réduction de la taille des spécimens, était observée. Cela est attribuable au dépôt graduel des composants supplémentaires sur la surface du réservoir de conservation des spécimens, comme le montrent la Figure V.26 et la Figure V.27. Depuis les premiers jours d'exposition, et tout au long de la période d'essai, un dépôt présentant une coloration blanche prononcée est observé sur les spécimens des bétons, résultant de la précipitation des fines particules de gypse partiellement dissoutes sur la surface du béton, conférant à la solution un aspect laiteux. En conséquence, des réductions significatives et des changements de la taille et de la forme des spécimens ont été observés après 120 jours d'immersion. Le taux de dégradation des bétons incorporant des cendres de canne a dépassé celui du béton témoin, notamment pour les bétons CC8 et CC16. L'aspect visuel et la couleur des spécimens de béton reflètent l'effet corrosif et sévère de l'acide H_2SO_4 sur le béton de sable à base d'ajout CA.

b. Perte de masse

La perte de masse des bétons à base d'ajout CA, exposés à une agression d'acide 5% H_2SO_4 pour les échéances étudiées (3, 7, 14, 21, 28, 56, 90, et 120 jours), augmente continuellement avec la durée d'exposition, à des taux différents selon le dosage de l'ajout cimentaire CA, atteignant son maximum à 120 jours (Figure V.14). Au cours des 28 premiers jours, cette augmentation est constante et proportionnelle jusqu'au dosage de 16% de CA, qui affiche les valeurs les plus élevées (26.17% à 28 jours). Toutefois, elle diminue pour le mélange CC24 pour atteindre une valeur minimale de 20.68% à 28 jours. Après 56 jours, le taux de la perte de masse de tous les mélanges a fortement augmenté. Néanmoins, la perte de masse des bétons contenant les cendres CA décroît avec l'augmentation de son dosage, en enregistrant une variation de 40.22–49.64% et de 73.85–81.89% à 56 jours et 90 jours, respectivement. Les valeurs les plus élevées sont affichées par le mélange CC8, tandis que les valeurs les plus faibles sont enregistrées par le béton CC24. A 120 jours, la perte de masse était très significative pour tous les mélanges atteignant les valeurs respectives de 90.90 % ; 94.92 % ; 93.66 % et 89.79 % pour les bétons CC0, CC8, CC16 et CC24. Le mélange CC8 est le plus susceptible à l'attaque par l'acide H_2SO_4 , à long terme. Tandis que, le mélange CC24 est le plus résistant à tous les âges. Ce qui dénote que les dosages élevés des cendres CA améliore la résistance des bétons de sable à l'agression par l'acide H_2SO_4 .

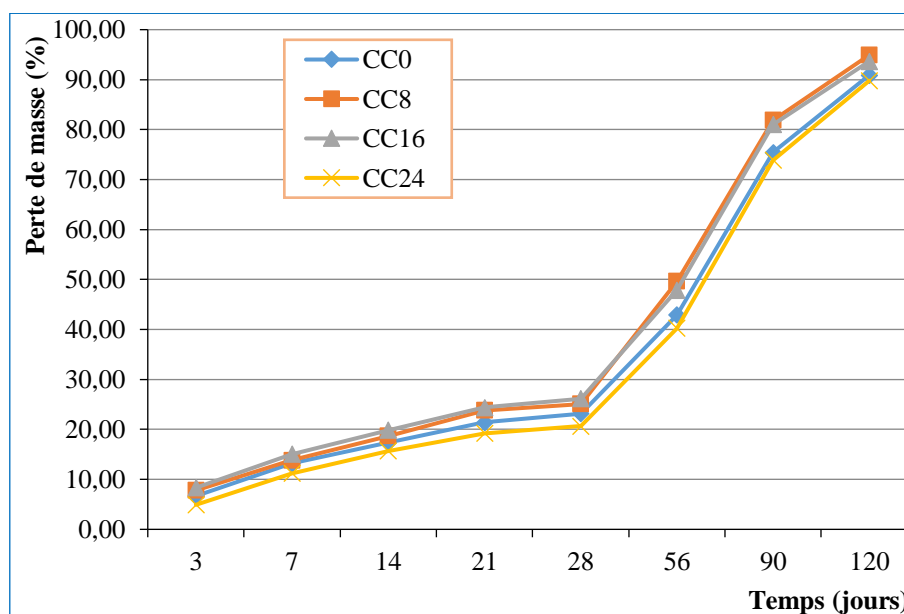


Figure V.14: Perte de masse des bétons de sable à base de CA en fonction de la période d'immersion dans 5% H_2SO_4

L'accroissement de la perte de masse proportionnellement à la durée d'exposition, est attribué à l'action très corrosive de l'acide H_2SO_4 , résultant de la dissolution des hydrates produits, induisant des bétons de sable poreux due à la lixiviation des phases de ciment ainsi qu'à l'érosion de petits granulats, accompagné d'une réduction de la masse et du volume. La coloration blanche observée à la surface des bétons après leur immersion dans la solution d'acide s'explique par la présence de gypse et d'ettringite, ce qui entraîne une détérioration rapide du béton. La diminution des performances à long terme, est dû à la transformation du $Ca(OH)_2$ en gypse, lequel est ensuite lessivé, entraînant ainsi une perte de masse par écaillage et laissant de grands pores dans le béton (Goyal et al., 2009; Al-Swaidani, 2021). Ainsi, l'action pouzzolanique cesse à cause de l'absence de l'hydroxyde de calcium, nécessaire à sa réaction.

L'augmentation de la perte de masse résulte aussi de la réaction de l'acide sulfurique avec les composés de calcium présents dans les fillers calcaires, entraînant la dégradation des bétons (Mohammad hosseini et al., 2021). Toutefois, Kannan et Ganesan (2014), ont signalé que la perte de masse et la dégradation de l'état des spécimens, est dû à la forte concentration d'alumine dans le béton, qui engendre du sulfoaluminate de calcium (ettringite). Des études antérieures ont établi que la formation d'ettringite dépend uniquement de la réaction entre l'alumine (Al_2O_3) et le sulfate (SO_4), ainsi que du rapport de ces deux composés. La formation d'ettringite entraîne une expansion du béton, ce qui engendre sa détérioration.

Les conclusions ont également indiqué qu'à long terme, une augmentation du dosage en CA entraînait une diminution de la perte de masse, probablement en raison de la réduction de la proportion de ciment, ce qui a diminué le taux de $Ca(OH)_2$. Des résultats similaires ont été obtenus par Kueaket et Tonnayopas (2021), qui ont montré que la perte de masse a été réduite par l'incorporation d'un taux de 30% des cendres de balle de riz (RHA) en remplacement partiel du ciment.

La diminution de la perte de masse pour le mélange CC24 sous l'action de l'acide H_2SO_4 , est dû aux propriétés chimiques et à l'activité pouzzolanique de cette proportion, à travers l'amélioration de l'adhérence entre la matrice cimentaire et les granulats, dû à la transformation de $Ca(OH)_2$ qui a tendance à se former à la surface des particules des granulats, en silicate de calcium hydraté C-S-H sous l'effet de la réaction pouzzolanique (Senhadji et al., 2012), de nature lente pour cette proportion de CA. Aussi, la teneur en calcium plus faible contribue à une meilleure résistance à l'acide sulfurique (Tipraj et Shanmugapriya, 2023). Benosman et al. (2011), ont attribué la réduction de la perte de masse pour les mortiers à base d'ajout, à la diminution de leur porosité du fait de l'ajout d'où une réduction de l'absorption des solutions acides. Les travaux d'Alnahhal et al. (2018), ont montré qu'à des niveaux de remplacement élevés, le pH de la solution présente dans les pores diminue, ce qui entraîne une diminution de la solubilité des silicates amorphes et, qui par conséquent, ralentit la vitesse de réaction. Lors de l'étude du processus de détérioration du béton sous l'agression de l'acide H_2SO_4 , Gay et al. (2016), ont indiqué dans le cas de sels très peu solubles, une couche dense se développe à l'interface, offrant ainsi une protection au matériau. Toutefois, l'effet chimique du taux 24% de CA, consiste en l'action des aluminates de calcium sur la composition de la pâte de ciment hydratée, qui résulte en la formation d'hydrates d'aluminate de calcium dans le béton contenant 24% de CA. Les hydrates d'aluminate de calcium sont chimiquement plus stables que les hydrates de silicate de calcium dans des environnements très acides. Cette hypothèse est soutenue indirectement par des études indiquant que les ciments à haute teneur en alumine et en aluminate de calcium améliorent la résistance du béton à l'attaque par l'acide H_2SO_4 , probablement en raison de leur forte teneur en aluminate, comme l'ont noté Senhadji et al. (2014). Tipraj et Shanmugapriya, (2023) ont rapporté que les échantillons exposés à l'acide H_2SO_4 ont également montré une formation de gypse, due à l'interaction entre les ions Ca^{2+} du gel C-A-S-H et les ions SO_4^{2-} provenant de l'acide.

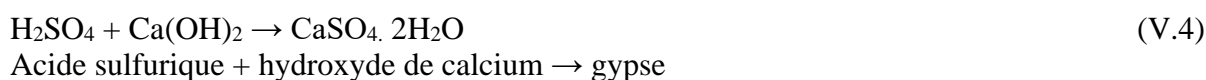
Ces résultats concordent avec d'autres études qui montrent l'effet positif des ajouts pouzzolaniques sur la résistance de la pâte de ciment à l'action de l'acide H_2SO_4 . Ogork et al. (2014), ont attribué l'amélioration du béton à base de cendres des coquilles d'arachide (GHA) exposé à l'acide H_2SO_4 à la diminution du contenu en $Ca(OH)_2$, libéré lors du processus d'hydratation et consommé dans la réaction pouzzolanique du GHA, laissant ainsi moins de $Ca(OH)_2$ pour réagir avec H_2SO_4 , ou en raison de la disponibilité réduite de C_3A qui forme l'ettringite. De plus, comme l'indique la littérature, le sulfate de calcium formé par cette réaction chimique est moins soluble dans l'eau par rapport au nitrate de calcium, ce qui explique la

meilleure résistance du béton incorporant 24% CA à l'acide sulfurique, malgré la force corrosive élevée de cet acide. Mohammad hosseini et al. (2021), ont souligné que les taux de perte de masse dans les mélanges contenant 30% de cendres de palmier à huile (POFA), étaient nettement inférieurs à celui du mélange sans ajout, engendrant une performance plus remarquable du béton contenant des cendres POFA. Cela pourrait s'expliquer par une concentration plus faible de composés réactifs, tels que le CaO, qui a ralenti le processus de dégradation et a empêché la formation de l'ettringite, responsable de l'expansion du béton. Kannan et Ganesan (2014), ont montré que les bétons mélangés avec les cendres de balles de riz (RHA) présentent une teneur en alumine plus faible et une teneur en silice plus élevée par rapport aux bétons mélangés avec le métakaolin (MK). C'est pourquoi les bétons mélangés avec les cendres RHA affichent une meilleure résistance à l'attaque de l'acide H₂SO₄.

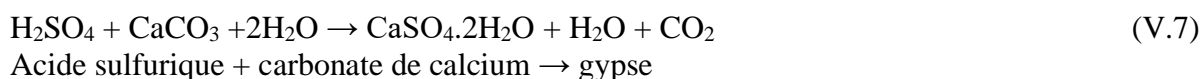
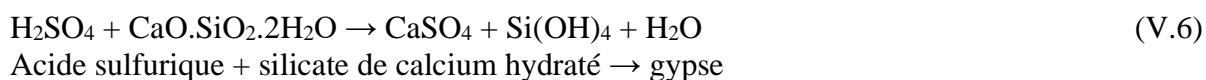
c. Action de l'acide H₂SO₄

Le processus de détérioration du béton sous l'agression de l'acide H₂SO₄, indiqué par Gay et al. (2016), se compose des étapes de dissolution et de précipitation. La phase initiale de l'attaque acide se caractérise par la dissolution de Ca(OH)₂, suivie éventuellement par la formation de couches protectrices. Ensuite, les sulfates de calcium cristallisent, entraînant la formation de gypse et de l'ettringite. Les résultats obtenus montrent que la cinétique de la corrosion acide provient essentiellement de l'étape de précipitation de la réaction, et selon Gay et al. (2016), la dégradation se manifeste à la fois à la surface et à l'intérieur des pores.

La dégradation du béton provoquée par l'action de l'acide H₂SO₄, décrite par Djerfaf et al. (2023), consiste en la réaction chimique entre l'hydroxyde de calcium (Ca(OH)₂) du béton et la solution acide, entraînant la formation principalement d'un produit de faible solubilité, se manifestant à la surface du béton qui est le gypse, associé à une expansion volumique comme indiqué dans l'équation (V.4). Cela peut induire des contraintes de traction dans le béton, entraînant ainsi des fissures et des écaillages. Une réaction supplémentaire du gypse avec les phases d'aluminate de calcium (C.A.S.H) présentes dans la matrice cimentaire peut donner lieu à la formation d'ettringite selon l'équation (V.5), laquelle engendre une augmentation de volume plus significative que celle du gypse, provoquant par conséquent un accroissement des fissures à la fois au niveau microscopique qu'au niveau macroscopique. Par ailleurs, l'acide H₂SO₄ décompose la matrice cimentaire en décalcifiant le C-S-H (équation (V.6)) par échange ionique entre l'hydrogène de la solution acide et le calcium du C-S-H, ce qui entraîne la formation d'un hydrogel amorphe soluble, contribuant ainsi à la dégradation de la surface corrodée et à la diminution de la résistance. Tipraj et Shanmugapriya (2023), ont indiqué que lorsque le carbonate de calcium se forme généralement lors de la réaction de carbonatation avec le gel C-A-S-H, il réagit avec l'acide H₂SO₄, pour produire du gypse comme indiqué dans l'équation V.7. La présence de ces hydrates a été validée par Benosman et al. (2011), qui ont affirmé que lors de l'exposition à l'acide H₂SO₄, le spectre FT-IR révèle la présence de gypse, comme l'indique également l'analyse par DRX. Par ailleurs, certaines bandes associées à la calcite (phases carbonatées) ont été identifiées. Koenig et al., (2017), ont signalé que les analyses par DRX confirmaient que la pâte de ciment durcie (c'est-à-dire les phases C-S-H, l'ettringite, et la portlandite) des liants riches en calcium, basés sur des ciments courants, se dégrade rapidement lors d'une attaque acide.



Gypse + aluminat de calcium hydraté → ettringite



Ainsi, l'acide H_2SO_4 altère la porosité et la structure du béton de sable par la formation constante de sels qui endommagent les spécimens de béton et entraînent une perte de masse significative, observée à long terme. Le béton CC8 a subi l'attaque la plus sévère en perdant 94.92% de sa masse et 97.1% de son volume, à 120 jours. Toutefois, le mélange CC24 a enregistré une amélioration en termes de perte de masse et de volume de 1.22% et 1.64%, en affichant les pertes de masse et de volume les plus faibles de 89.79% et 92.5%, respectivement.

Il est à noter que le mélange à base d'ajout CC24 a montré une amélioration de la résistance chimique contre l'attaque par l'acide H_2SO_4 durant toute la période d'immersion. Une diminution de la perte de masse de 1.22% a été observée à 120 jours par rapport au béton témoin. La réduction de la perte de masse pour le mélange CC24 est attribuable aux propriétés chimiques et à l'activité pouzzolanique de cette proportion.

d. Variation de volume

La Figure V.15 illustre la variation de volume des bétons de sable à base de cendres de canne après l'attaque par l'acide sulfurique sur une période d'essai de 28 et 120 jours.

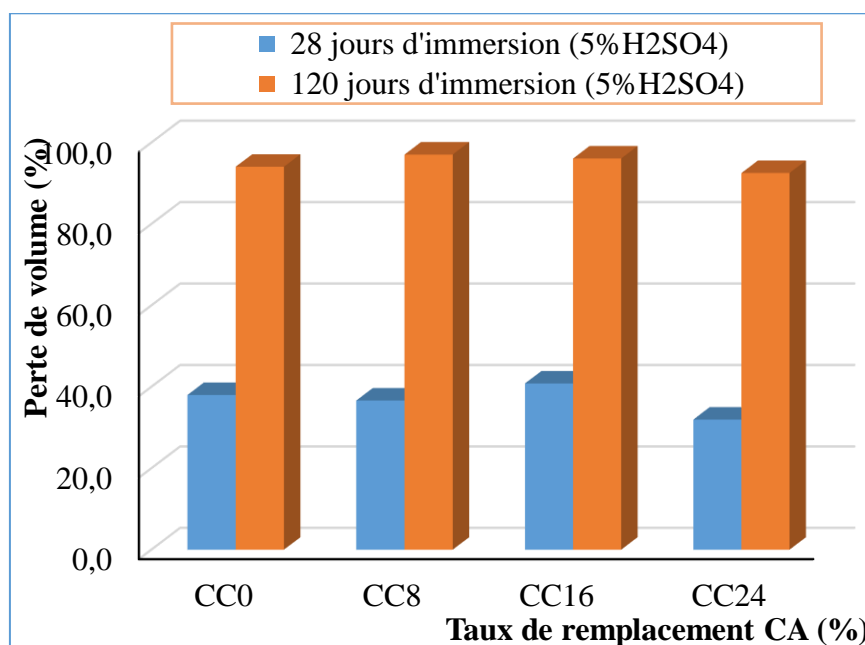


Figure V.15: Perte de volume des bétons de sable à base de cendres de canne à 28 jours et 120 jours d'immersion dans 5% H_2SO_4

A 28 jours, les mélanges CC8 et CC24, affichent une amélioration de la perte de volume de 3.62% et 15.92%, respectivement par rapport au béton témoin qui a perdu 38% de son volume, suivi du mélange CC16 en perdant 40.83%. Cela est attribué selon Goyal et al. (2009), à l'agression du béton par l'acide sulfurique, qui réagit avec la portlandite et l'hydrate d'aluminat

de calcium pour former du gypse et de l'ettringite, entraînant une augmentation du poids initial et provoque l'expansion du béton. Mohammad hosseini et al. (2021), attribut l'expansion du béton à la réaction d'autres composants du ciment portland avec le gypse.

A 120 jours, la perte de volume des bétons incorporant 8–24% CA diminuait avec l'augmentation du dosage en cendres. Le béton CC8 a subi l'attaque la plus sévère en perdant 97.1% de son volume. Toutefois, le mélange CC24 a enregistré une amélioration en termes de perte de volume de 1.64%, en affichant la perte de volume la plus faible de 92.5%, par rapport au béton témoin qui a perdu 94.1% de son volume et le mélange CC16 qui a perdu 96.1%. Ceci peut s'expliquer par la poursuite de l'expansion, résultant en des fissures qui entraînent finalement le décollement de la couche superficielle du béton et la réduction de son volume, comme le montre la perte de masse de béton qui commence après environ un mois d'exposition à la solution d'acide sulfurique (Goyal et al., 2009). Néanmoins, la diminution de la perte de volume pourrait être attribuée à une concentration plus faible de composés réactifs, tels que le CaO, notamment pour cette proportion de 24% de CA. Ce qui a ralenti le processus de dégradation et empêché la formation d'ettringite, qui aurait pu provoquer l'expansion du béton (Mohammad hosseini et al., 2021). Toutefois, Aliques-Granero et al. (2016) attribut l'insolubilité de la surface corrodée à la présence d'aluminium dans le liant.

Le phénomène de variation de volume peut être expliqué par la solubilité du sulfate de calcium (CaSO_4) formé est considérée comme faible selon la littérature, ce qui empêche sa dissolution. D'autre part, les produits de réaction tels que le gypse et l'ettringite présentent une stabilité structurale très inférieure par rapport aux réactifs qu'ils remplacent. Ils entraînent une augmentation de volume et, par conséquent, occupent l'espace disponible sous forme de vides dans le béton, ce qui est constaté à 28 jours d'exposition. Cependant, après un certain temps, l'expansion continue provoque des fissures qui mènent finalement au détachement de la couche superficielle du béton, comme l'indique la perte de masse des bétons qui commence après environ un mois d'exposition à la solution d'acide sulfurique (Goyal et al., 2009), résultant en un changement de volume des spécimens. Par ailleurs, l'acide sulfurique décompose la matrice cimentaire en décalcifiant l'hydrate de silicate de calcium (C–S–H) des bétons, dont le taux est fonction du dosage de CA et de sa réactivité, ce qui justifie les valeurs obtenues à 120 jours d'exposition.

Ainsi, le béton CC8 a été le plus affecté par l'acide H_2SO_4 , enregistrant une perte de 94.92% de sa masse et de 97.1% de son volume après 120 jours d'exposition. Toutefois, le mélange CC24 a montré une amélioration des pertes de masse et de volume, avec des valeurs respectives de 1.22 % et 1.64 %, affichant les pertes les plus faibles de 89.79% et 92.5%. De plus, des dosages élevés des cendres CA renforcent la résistance des bétons de sable contre l'agression de l'acide H_2SO_4 .

Les résultats indiquent donc que le béton CC24 présente un comportement favorable et est considéré comme le plus durable en termes de pertes de masse et de volume lorsqu'il est soumis à un environnement agressif à base d'acide H_2SO_4 à 5% pendant toute la durée d'exposition de 120 jours. Le béton CC8 a subi l'attaque la plus sévère à long terme, tandis que le béton CC16 est le plus vulnérable face à cette agression, à court et moyen termes.

V.2.4.3. Effet de l'acide nitrique HNO_3

a. Examen visuel

L'inspection visuelle révèle une détérioration des spécimens en béton après leur immersion dans une solution à 5% d'acide nitrique (HNO_3) pendant une durée de 120 jours, affectant principalement les côtés, les angles, les arêtes et la surface externe des spécimens. Leur forme est restée pratiquement inchangée jusqu'à 28 jours, cependant, au-delà de cette période et jusqu'à 120 jours, un changement de leur forme a été constaté. La décoloration brune observée sur ces spécimens résulte de l'érosion de la surface du béton (Figure V.26 et Figure V.27). Les dépôts résultant de l'attaque acide, montrent une teinte brun clair au début de l'exposition, suivie d'une décoloration brune après 28 jours et jusqu'à 120 jours d'attaque, attribuée à la précipitation des nitrates de calcium à la surface du béton. De plus, la corrosion induite par l'acide n'affecte que la surface externe des spécimens en béton, laissant ainsi la couche interne intacte.

b. Perte de masse

La Figure V.16 illustre l'évolution de la perte de masse des bétons de sable en fonction d'une période d'immersion de 120 jours, lorsqu'ils sont exposés à 5% d'acide nitrique, et qui montrent que la perte de masse des bétons contenant 8-24% CA est plus élevée que celle du béton témoin (sans ajout).

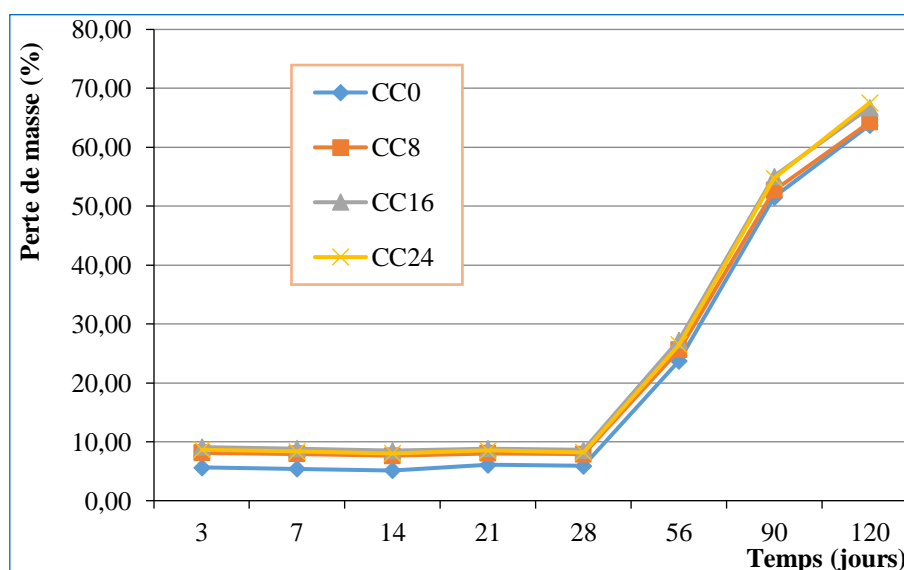


Figure V.16: Perte de masse des bétons de sable à base de CA en fonction de la période d'immersion dans 5% HNO_3

Au jeune âge jusqu'à 90 jours d'exposition, la perte de masse augmente avec le dosage de CA jusqu'à un taux de 16%, au-delà duquel une diminution a été observée pour le taux de 24%. Ceci est assigné au degré de réactivité qui dépend du taux de substitution du ciment portland par l'ajout CA. Toutefois, une augmentation proportionnelle au dosage de CA a été constatée à 120 jours. Cela s'explique par le fait que l'augmentation des proportions de cendres entraîne une hausse de la porosité des bétons, ce qui accroît le volume d'eau dans les pores capillaires. Cela permet aux ions acides de pénétrer plus profondément dans la structure des bétons, provoquant ainsi une réaction plus intense, comme a été mentionné par Chatveera et Lertwattanak (2014).

Il est à noter qu'une légère diminution de la perte de masse est observée du 3^{ème} au 14^{ème} jour de l'attaque acide, affichant les valeurs respectives, de 5.62–9.12% au 5.12–8.51%. Cette diminution se poursuit du 21^{ème} au 28^{ème} jour, atteignant les valeurs de perte de masse de

6.09–8.85% au 5.89–8.63%. La diminution de la perte de masse peut être attribuée à un taux de corrosion élevé au début de l'exposition, qui tend à diminuer par la suite. Car durant cette période initiale, d'importantes quantités de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ se dissolvent de la matrice cimentaire et interagissent avec les ions acides. Ensuite, les ions calcium et hydroxyde sont lessivés, atteignant une saturation de la solution. Une fois que ces composés épuisés, il ne reste que le $\text{Ca}(\text{OH})_2$, associé au C-S-H, qui est difficilement soluble. Cela entraîne une réduction du lessivage et, par conséquent, une réaction acide moins intense, comme l'ont souligné Chatveera et Lertwattanakul (2014). Une augmentation significative est observée, à partir du 56^{ème} jours pour atteindre les valeurs de 23.76–26.51%, en raison de la solubilité dans l'eau du sel de calcium formé, entraînant une perte de masse plus élevée, comme a été indiqué par Goyal et al. (2009). Cette perte de masse augmente progressivement jusqu'au 120 jours, affichant les valeurs de 63.79% ; 64.25% ; 66.75% et 67.56% pour les taux respectifs de CA de 0%, 8%, 16% et 24%, dû à l'effet corrosif de l'acide.

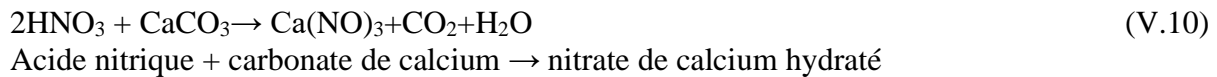
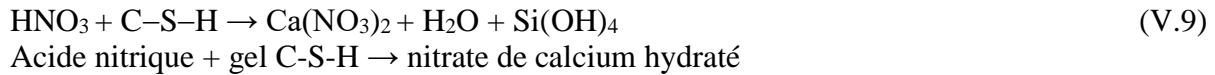
Les mêmes résultats ont été indiqués par Ogork et al. (2014), qui ont attribué la faible résistance du béton incorporant des cendres des coquilles d'arachide (GHA), exposé à 10% d'acide HNO_3 par rapport au béton ordinaire (sans ajout), à une réaction pozzolanique incomplète de GHA après 28 jours de cure dans l'eau, qui tend à réduire la quantité de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ disponible pour réagir avec les acides. Néanmoins, les travaux de Chatveera et Lertwattanakul (2014), ont montré que la perte de masse des mortiers incorporant 10-30% des cendres de balle de riz noir (BHRA) exposés à l'acide nitrique, était inférieure à celle du mortier de contrôle, en raison de la plus grande capacité d'absorption d'eau de BHRA, induisant des volumes d'eau plus faibles dans les pores capillaires, ce qui a réduit la dissolution des ions nitriques et par conséquent, a diminué la corrosion. Toutefois, un taux de substitution de 40 à 50 % de BRHA conduit à une diminution de la réactivité pouzzolanique, car une quantité réduite de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ est produite lors du processus d'hydratation.

Selon Goyal et al. (2009), il est essentiel de mener des études microstructurales supplémentaires afin de confirmer d'autres paramètres et d'obtenir une meilleure compréhension de l'attaque par l'acide nitrique. Gay et al. (2016), ont montré dans une étude menée sur la cinétique de corrosion du ciment portland durci, soumis à une attaque acide que la nature hétérogène et évolutive de la surface réactive a un impact significatif sur la cinétique de réaction des minéraux. Par la suite, des sels de nitrate précipitent, et la solubilité du calcium est modifiée en conséquence, étant en équilibre avec au moins deux composants solides (portlandite et sel nitrate).

c. Action de l'acide HNO_3

La perte de masse est due à la formation de nitrates de calcium $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$, suite à la réaction chimique entre l'acide nitrique (HNO_3) et l'hydroxyde de calcium ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), ainsi qu'avec les silicates de calcium hydratés (C-S-H), comme indiqué dans les équations (V.8) et (V.9). Tipraj et Shanmugapriya (2023), ont indiqué que lorsque le carbonate de calcium se forme généralement lors de la réaction de carbonatation avec le gel C-A-S-H, il réagit avec l'acide nitrique, pour produire du nitrate de calcium, comme indiqué dans l'équation V.10. L'attaque de l'acide nitrique entraîne une diminution du calcium, ce qui suggère qu'il y a eu une sorte de réaction entre le gel C-A-S-H et l'ion NO_3 provenant de l'attaque acide.





Les résultats montrent que le béton témoin CC0 se révèle être le plus résistant face à l'agression par l'acide HNO_3 durant toute la période d'exposition, enregistrant une perte de 63.79% de sa masse à 120 jours, suivi du mélange CC8 qui affiche une valeur de 64.25%. En revanche, le mélange CC16 est le plus vulnérable à cette attaque durant les 90 jours d'exposition; cependant, à 120 jours d'attaque le CC24 est le plus susceptible en perdant 67.56% de sa masse. Ces résultats sont en cohérence avec ceux de la littérature (Goyal et al., 2009).

d. Variation de volume

Les résultats de la variation de volume des bétons à base de CA, montrent que tous les bétons étudiés ont subi une réduction de volume suite à l'agression de l'acide 5% HNO_3 , (Figure V.17), obtenus après 28 jours et 120 jours d'exposition.

À 28 jours d'attaque, il a été constaté que les bétons incorporant CA avaient subi une perte de volume d'une variation de 25.6–30.4% plus élevée par rapport au béton témoin, qui a perdu 25.5% de son volume. Le béton CC24 a présenté un résultat presque comparable à celui du témoin de 25.6%, car l'incorporation de volume élevé de CA à propriétés pouzzolaniques dans le mélange, entraîne une réaction d'hydratation plus lente qu'avec le ciment portland (Chatveera et Lertwattanakul, 2014). Toutefois, les bétons CC8 et CC16 ont affiché les valeurs respectives de 27.1% et 30.4%, attribué à une diffusion différente des ions acides dans les pores. Aussi l'augmentation de la perméabilité amplifie la réaction des ions acides avec les composés chimiques présents dans la matrice du béton, notamment au début de l'attaque acide pour produire les nitrates de calcium, affectant la variation de volume des bétons. Alnahhal et al. (2018), ont signalé que le taux de diffusion de l'eau ou d'autres solutions par absorption capillaire est étroitement lié à la perméabilité du réseau poreux, ce qui impacte significativement le comportement du béton exposé à des environnements agressifs. Ceci concorde avec les conclusions obtenues avec les résultats d'absorption capillaire et de sorptivité.

Après 120 jours d'attaque, les bétons de sable incorporant 8% et 24% CA, ont montré respectivement, les valeurs les plus faibles de 67% et 72.5% par rapport au béton témoin, qui a perdu 73.8% de son volume. Cela s'explique par le fait que le taux de 8% CA constitue une quantité adéquate, favorisant la réaction pouzzolanique qui se développe à long terme entre les cendres CA et le $\text{Ca}(\text{OH})_2$, par la formation d'un gel C-S-H secondaire, induisant l'amélioration du réseau poreux par l'affinement des pores. Aussi, selon la littérature l'épuisement du $\text{Ca}(\text{OH})_2$ en raison de la réaction pouzzolanique, diminue les effets de la corrosion acide pour certains taux de remplacement, ce qui est perceptible aussi pour le mélange CC24. Tandis que, le béton CC16 a marqué la valeur la plus élevée de 74.3%, attribuable à la diminution de la formation des produits d'hydratation. Chatveera et Lertwattanakul (2014), attribuent cela à l'augmentation de la quantité de nitrate de calcium induisant un taux d'expansion plus élevé, qui se forme à partir de la réaction entre les ions de l'acide nitrique et le $\text{Ca}(\text{OH})_2$, ainsi qu'avec le C-S-H.

Les résultats obtenus indiquent que le béton témoin, est le plus résistant en termes de perte de volume, après 28 jours d'exposition à l'acide HNO₃ à 5%, suivi du béton CC24, affichant un résultat presque similaire de 25.6%. Tandis que les bétons CC8 et CC16 ont subi une réduction respective de 6.5% et de 19.21% par rapport au témoin. Après une période de 120 jours, les bétons de sable contenant 8% et 24% CA, sont les plus résistants, enregistrant respectivement, une amélioration de 9.28% et 1.86% par rapport au béton témoin, qui a perdu 73.8% de son volume. Le béton CC16 a marqué la valeur la plus élevée avec une perte de 74.3%.

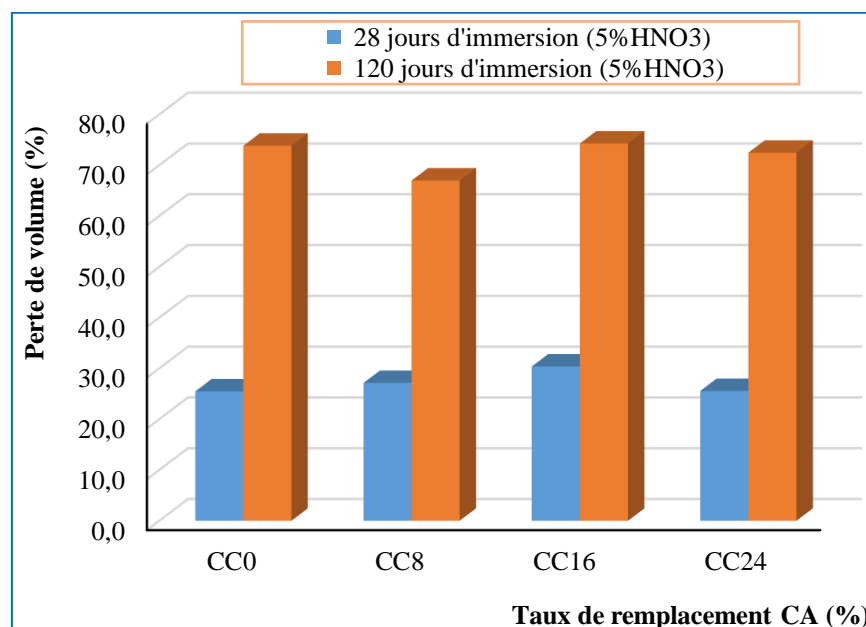


Figure V.17: Perte de volume des bétons de sable à base de cendres de canne à 28 jours et 120 jours d'immersion dans 5% HNO₃

En conséquence, les bétons CC0 et CC8, se révèlent être les plus résistants en termes de perte de masse et de volume après 120 jours d'exposition à une solution de 5 % d'acide HNO₃. Cependant, les bétons CC24 et CC16 sont les plus vulnérables.

V.2.4.4. Effet de l'acide acétique CH₃COOH

a. Examen visuel

A partir de l'inspection visuelle, les spécimens immergés dans une solution à 5% d'acide acétique (CH₃COOH) présentaient une surface homogène et exempte de fissures. Ces spécimens ont conservé des formes approximativement cubiques, bien que leurs dimensions aient considérablement diminué, avec des altérations visibles sur leurs contours et angles, en raison de l'érosion provoquée par l'attaque acide. Les surfaces des spécimens se sont révélées avec une teinte brun rouille, suite à la suppression de la couche de béton altérée. Une couche brune, clairement visible, s'est déposée, et les solutions acides prenaient une coloration rougeâtre dès la première semaine et jusqu'à 120 jours d'immersion (Figure V.26 et Figure V.27). Ce phénomène est associé à la précipitation d'acétate de calcium à la surface du béton. Tandis que la teinte rouille résulte de la présence d'hydroxydes de fer amorphes, dont la formation est attribuée au caractère oxydant de cet acide (Benosman et al., 2011). De plus, l'attaque acide n'affecte que les couches externes des spécimens; les couches internes demeurent intactes.

b. Perte de masse

Les résultats illustrés sur la Figure V.18 montrent que les spécimens exposés à 5% d'acide acétique (CH_3COOH) révèlent une augmentation de la perte de masse avec le temps d'exposition pour tous les bétons étudiés.

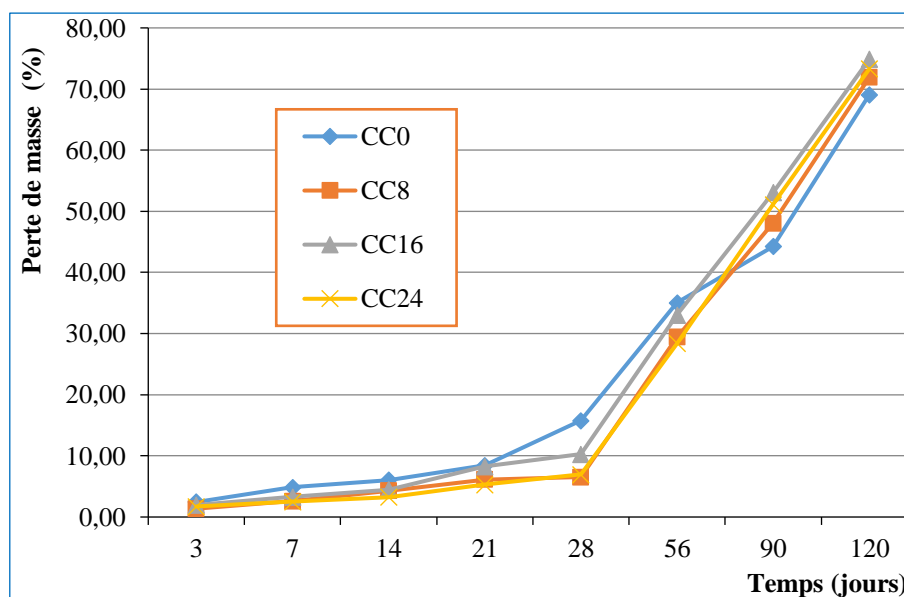


Figure V.18: Perte de masse des bétons de sable à base de CA en fonction de la période d'immersion dans 5% CH_3COOH

Durant la première semaine jusqu'au 56^{ème} jour d'exposition, la perte de masse des bétons contenant 8–24% CA était inférieure à celle du béton témoin. Une légère augmentation a été observée durant la 1^{ère} semaine jusqu'à l'âge de 28 jours, avec une variation de 6.52–15.79%. A partir de 56^{ème} jour, un accroissement significatif de la perte de masse variant de 28.39–35.06%, a été relevé.

L'amélioration de la résistance chimique des bétons contenant les cendres CA en termes de perte de masse durant les 56 jours d'exposition, peut être attribuée à la réduction de la production totale de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, grâce à l'augmentation de C–S–H, résultant de la réaction pouzzolanique des bétons à base d'ajout CA, riche en silice et faible en calcium, remplaçant partiellement le ciment portland, comme l'ont souligné Nochaiya et al. (2022). De plus, Koenig et al. (2017), ont observé une corrélation significative entre la perte de masse et la teneur en CaO du liant. Les bétons incorporant un ajout cimentaire à faible teneur en calcium, ont affiché la plus faible perte de masse sous l'action de l'acide acétique, tandis que ceux dépourvus d'ajout ont enregistré la perte de masse la plus élevée.

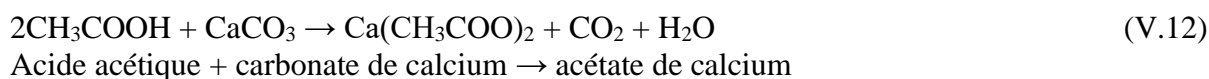
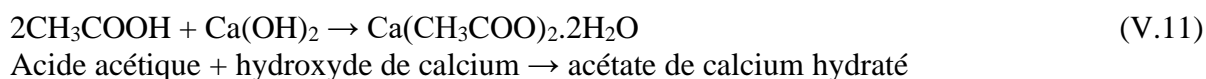
Néanmoins, entre 90 jours et 120 jours, les bétons contenant l'ajout CA ont montré une perte de masse la plus élevée, avec des variations de 48.04–71.90%, 53.05–74.88% et de 51.09–73.30% pour les mélanges respectifs CC8, CC16 et CC24, par rapport au béton témoin CC0 qui a présenté la perte de masse la plus faible, marquant une variation de 44.25–69.08%.

Ce qui dénote que le témoin CC0 s'est révélé être le plus résistant à l'agression acide, suivi du béton CC8 qui s'est classé en deuxième position.

Ces résultats concordent avec ceux obtenus par Chatveera et Lertwattanakul (2014), qui ont montré que la perte de masse sous l'action de l'acide acétique des mortiers contenant 40% et 50% de cendres de balles de riz noirs (BRHA) en substitution partielle du ciment portland ordinaire, était plus élevée à celle du mortier témoin, résultant d'une érosion accrue et d'une porosité plus élevée, attribuée à la grande solubilité de l'acétate de calcium. De plus, la forte porosité des cendres BRHA qui augmente avec le taux de remplacement, permet une absorption d'eau plus importante par les particules et favorise la désintégration des ions acides dans la matrice du mortier et sa corrosion.

c. Action de l'acide CH₃COOH

La corrosion du béton provoquée par l'acide acétique (CH₃COOH), résulte de la réaction chimique entre l'hydroxyde de calcium (Ca(OH)₂) du béton et la solution acide, entraînant la formation d'acétate de calcium (équation V.11). La diminution du Ca(OH)₂, favorise la réaction de l'acide acétique avec les carbonates de calcium (CaCO₃) présents dans les fillers calcaires des bétons de sable étudiés, induisant la formation du sel d'acétate de calcium (équation V.12). Les analyses FTIR, menées par Benosman et al. (2011), ont validé la réaction mentionnée ainsi que les hydrates qui en résultent.



Le mécanisme de corrosion par l'acide acétique (CH₃COOH), débute par la dissociation des ions hydronium (H₃O⁺) et acétate (CH₃COO⁻), et leur infiltration à travers l'eau dans les pores capillaires, entraînant une perte d'équilibre interne due à la diminution de l'alcalinité. Lorsque l'alcalinité descend en dessous de 12, le Ca(OH)₂ dissous crée un cheminement interconnecté de capillaires poreux, permettant aux ions acides de pénétrer plus profondément dans la structure interne. Par ailleurs, cette réduction de l'alcalinité provoque la désintégration de la structure du silicate de calcium hydraté et l'augmentation de la taille des pores (Chatveera et Lertwattanakul, 2014). Nochaiya et al. (2022), ont indiqué que lorsque le pH descend en dessous des limites de stabilité des hydrates de ciment (Ca(OH)₂ et C-S-H), l'hydrate correspondant perd du calcium et se décompose en hydrogel amorphe, pour former principalement des sels de calcium, qui sont très solubles dans l'eau, et facilement lessivés par la solution agressive. Cela provoque une élévation de la perméabilité et de la porosité, entraînant ainsi une réduction de la masse et de la résistance à la compression du béton.

Ainsi, durant les 56 jours d'exposition, les bétons contenant respectivement 24% et 8% CA montrent une amélioration de la résistance à l'attaque par l'acide acétique en termes de perte de masse de 16.05% et 19.04% à 56 jours, comparativement aux autres bétons. Néanmoins, à long terme, le béton témoin CC0 s'est révélé être le plus résistant à l'agression acide, en affichant une perte de masse minimale de 69.08%, suivi par le béton CC8 qui a enregistré une réduction de 4.09% par rapport au béton témoin à 120 jours d'exposition.

d. Variation de volume

Les résultats présentés sur la Figure V.19, indiquent que la diminution du volume des bétons de sable incorporant des cendres CA, lorsqu'ils sont soumis à l'action de l'acide acétique à 5%, croît avec la durée d'exposition, atteignant son maximum après 120 jours pour l'ensemble des bétons.

A 28 jours, la perte de volume des bétons étudiés est inversement proportionnelle au dosage en cendres CA. Le béton témoin CC0 a affiché la valeur la plus élevée, avec une perte de 33.4% de son volume, suivi des mélanges CC8, CC16 et CC24 ayant respectivement perdu 32%; 28.8% et 20.4% de leur volume. Ceci, grâce à l'augmentation de l'hydrate de silicate de calcium C-S-H résultant de la réaction pouzzolanique (Chatveera et Lertwattanakul, 2014)

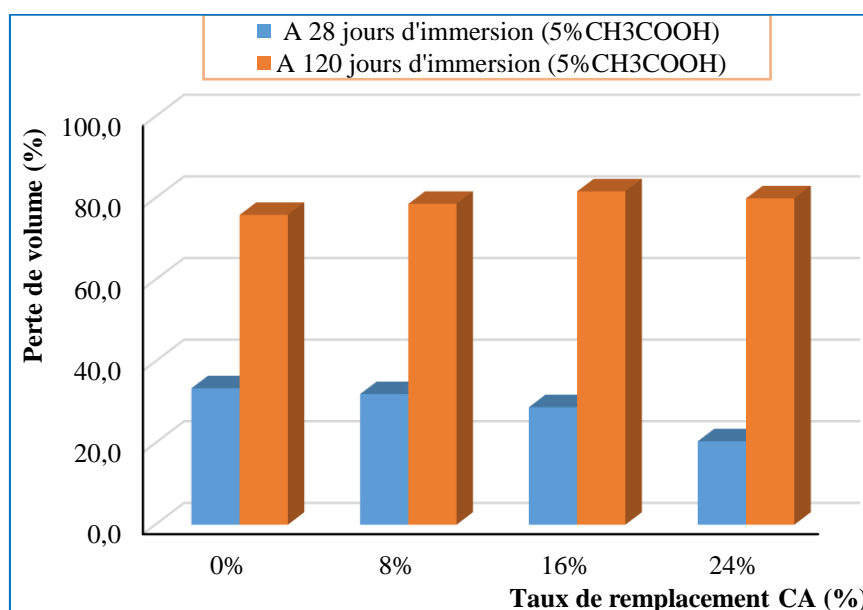


Figure V.19: Perte de volume des bétons de sable à base de cendres de canne à 28 jours et 120 jours d'immersion dans 5% CH₃COOH

Après 120 jours d'exposition, les bétons CC8, CC16, et CC24 ont montré une perte de volume de 78.6%, 81.7% and 80%, plus élevée que le béton témoin qui a perdu 75.9% de son volume. Ceci est dû à la décomposition de la matrice cimentaire, qui augmente la porosité et la perméabilité des bétons incorporant CA par rapport au mélange témoin, ce qui entraîne une réduction de la masse et du volume.

Les résultats obtenus ont démontré que l'ajout de 8–24% de cendres de canne (CA), améliore la résistance et la durabilité des bétons en termes de perte de masse et de variation de volume durant les 56 jours d'exposition lors de l'exposition à l'acide acétique à 5%, en comparaison avec le béton témoin, qui s'est révélé être le plus affecté durant les 56 jours d'agression. Cependant, à long terme, le béton témoin se montre le plus durable, suivi du béton CC8; tandis que le béton CC16 est le plus vulnérable après 120 jours d'exposition.

*Perte de masse des bétons de sable à base de cendres de canne dans les différentes solutions acide

Il en découle que la dégradation des bétons de sable à base de CA, est constatée de manière plus sévère dans la solution H_2SO_4 , atteignant des valeurs significatives de perte de masse et de volume notamment après 120 jours d'exposition. Suivie respectivement par les acides CH_3COOH , HNO_3 et HCL , de même concentration (5%) (Figures V.20 et V.21). Cette différence pourrait s'expliquer par le fait qu'en plus de la lixiviation, l'attaque H_2SO_4 provoque la formation de l'ettringite expansive dans les pores du béton, ce qui entraîne l'apparition de fissures. De plus, le sulfate de calcium résultant de cette réaction est moins soluble dans l'eau par rapport aux sels de calcium générés par les autres acides, se déposant ainsi dans les vides induisant des contraintes internes susceptibles de provoquer la rupture de la matrice (Khushnood et al., 2014). L'acide CH_3COOH a un effet néfaste plus significatif que celui des acides forts tels que HNO_3 ou HCL , en raison de son effet tampon et de la grande solubilité des produits issus de sa réaction. Selon la littérature, l'effet des acides HNO_3 et HCL sur les matériaux cimentaires est comparable, car les sels de calcium produits sont solubles dans l'eau. Néanmoins, dans la présente étude, en dépit de leur apparence similaire, l'action corrosive de HNO_3 est plus nuisible que celle engendrée par le HCL , probablement en raison de la différence de solubilité des sels de calcium formés (Gay et al., 2016). Ce dernier a induit une perte de masse d'environ la moitié (50 %) de celle observée avec la solution H_2SO_4 par rapport à celle de HNO_3 (71%). Aussi, il est à noter que le phénomène de perte de volume est plus marqué que celui relatif à la perte de masse dans les milieux acides étudiés. Cette constatation est confirmée par Gay et al. (2016), qui ont examiné la dégradation du ciment hydraté exposé à des solutions acides de forte concentration (pH 2), révélant que l'action de H_2SO_4 est la plus sévère, suivi par HNO_3 et HCL . De plus, Alnahhal et al. (2018), ont souligné que la décomposition de la matrice du ciment entraîne une réduction à la fois de la masse et du volume. En outre, les propriétés pouzzolaniques des ajouts cimentaires sont influencées par leur degré de réactivité, qui est lui-même lié au taux de remplacement (Khushnood et al., 2014).

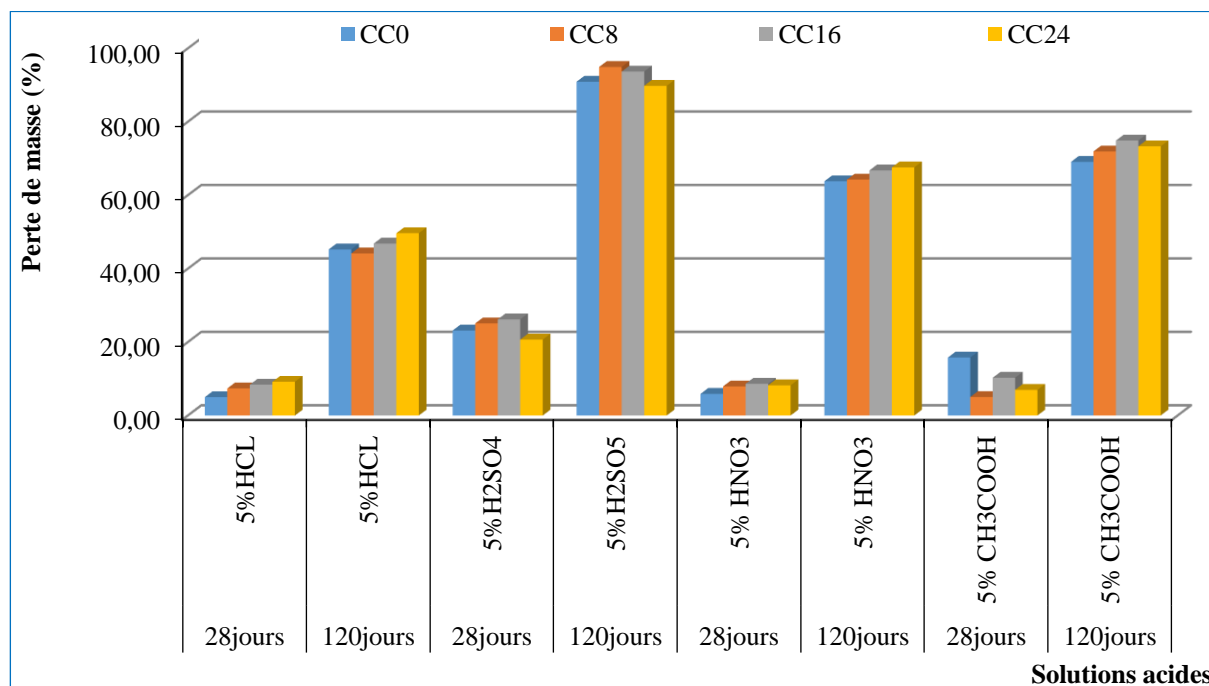


Figure V.20: Perte de masse des bétons de sable à base de cendres de canne dans les solutions acides à 5% de: HCL, H₂SO₄, HNO₃, CH₃COOH à 28 et 120 jours

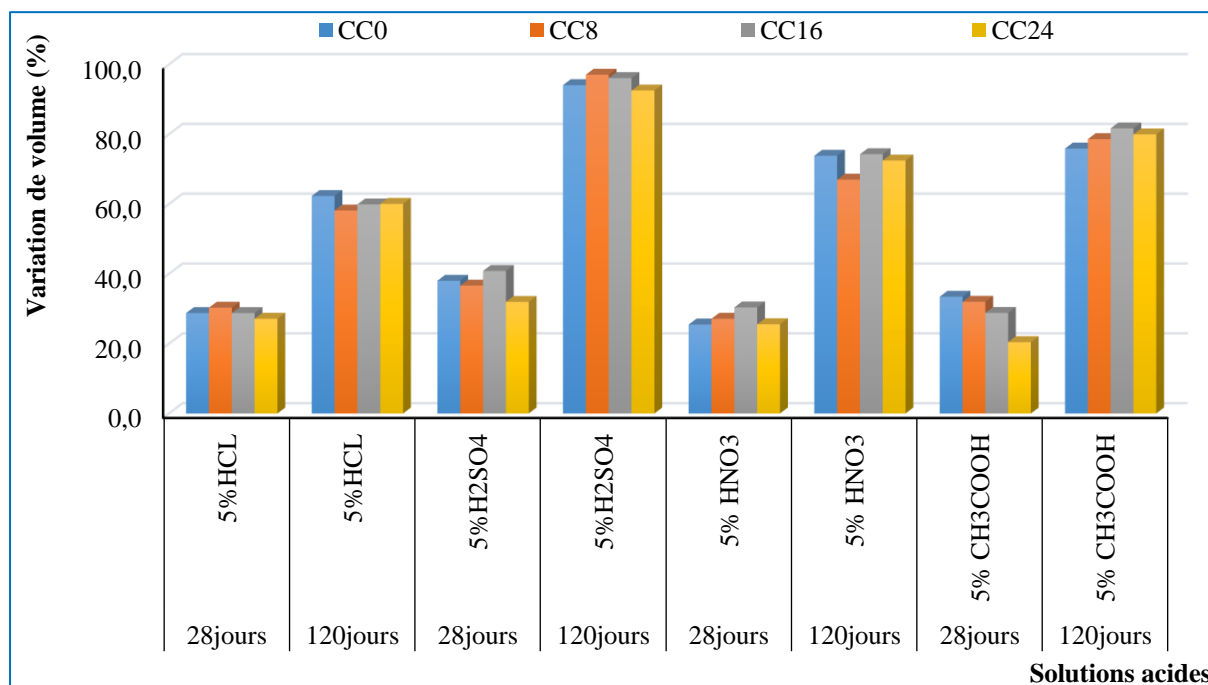


Figure V.21: Variation de volume des bétons de sable à base de cendres de canne dans les solutions acides à 5% de: HCL, H₂SO₄, HNO₃, CH₃COOH à 28 et 120 jours d'immersion

V.2.4.5. Effet de l'hydroxyde de sodium NaOH

a. Examen visuel

La figure V.27 illustre l'état final des spécimens en béton après une exposition de 120 jours à une solution d'hydroxyde de sodium à 5%. Aucun dépôt, aucune décoloration ni changements perceptibles dans l'apparence des spécimens et de la solution d'attaque n'ont été observés pour l'ensemble des bétons examinés (Figure V.26). L'inspection visuelle n'a révélé aucune différence évidente entre les spécimens.

b. Gain de masse

La figure V.22 montre la variation du gain de masse du béton de sable à base de cendres de canne en fonction de la période d'immersion dans la solution d'hydroxyde de sodium à 5% (NaOH) pour les échéances de 3, 7, 14, 21, 28, 56, 90 et 120 jours.

Durant la période d'exposition, une légère augmentation du gain de masse a été observée pour les mélanges CC0, CC8, CC16 et CC24 jusqu'à l'âge de 90 jours, atteignant des valeurs maximales de 2.44% ; 1.97% ; 1.37% et 1.71%. Par la suite, ce gain de masse diminue à l'âge de 120 jours, en marquant les valeurs respectives de 2.34% ; 1.87% ; 1.27% et 1.52%. Les mélanges CC16 et CC24 ont montré une baisse du gain de masse presque insignifiante entre le 21^{ème} et le 28^{ème} jour d'exposition, affichant respectivement des variations de valeurs de 1.13–1.12% et 1.53–1.50%, suivie d'une augmentation à l'âge de 56 jours. Néanmoins, les gains de masse demeurent relativement stables entre le 21^{ème} et le 28^{ème} jour pour l'ensemble des bétons.

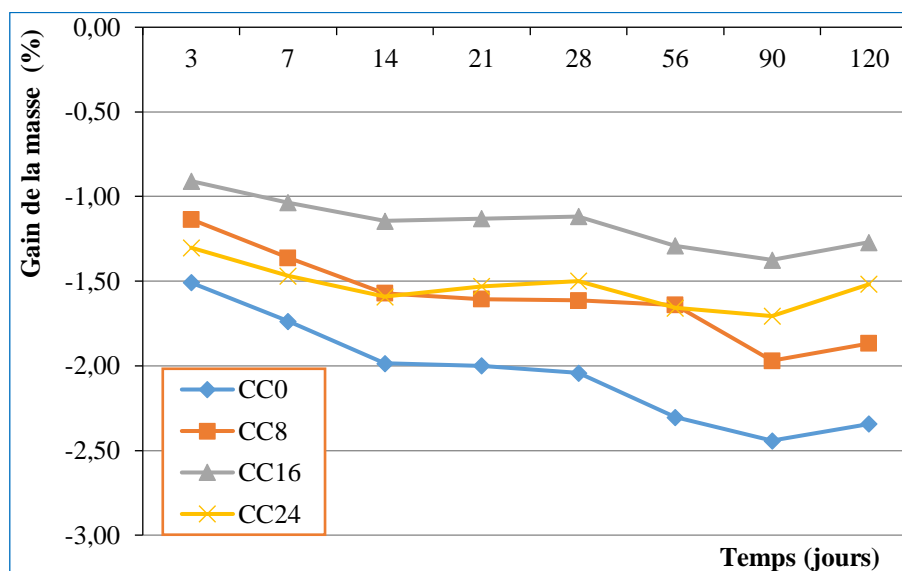


Figure V.22: Gain de masse des bétons de sable à base de CA en fonction de la période d'immersion dans 5% NaOH

Ce phénomène indique le début d'un processus de gonflement des bétons, engendré par les interactions chimiques entre les hydrates et la solution alcaline NaOH. Le gain de masse augmente progressivement, le béton témoin affiche les résultats les plus élevés en termes de gain de masse à tous les âges, par rapport aux bétons incorporant les cendres CA. Le mélange CC16 présente les meilleures performances face à l'attaque alcaline, suivi par le mélange CC24 et CC8.

c. Action de NaOH

Witkowska-Dobrev et al. (2021), a décrit l'action de la solution de NaOH à 5%, laquelle a engendré un environnement plus alcalin, ainsi qu'une concentration élevée d'ions OH^- dans l'eau présente dans les pores. Ce phénomène peut favoriser la réaction d'hydratation entre les composants du ciment et conduire à la formation de produits hydratés tels que le C-S-H et le C-A-H. Dans cet environnement alcalin, le pH reste stable; en maintenant un pH élevé, l'intégrité du pH du spécimen de béton sera préservée. De plus, la nature alcaline de cet environnement stimule une alcalinisation accrue due à l'hydroxyde de sodium. Les sels peu solubles formés n'atteignent pas un volume significatif et n'endommagent pas substantiellement la structure du béton.

Les bétons à base de 8-24% de cendres de canne, affichent les meilleures performances comparativement au béton témoin CC0.

Ainsi, le béton à base de CA résiste à l'action de NaOH à 5%, ce qui montre que l'ajout de cendres de canne a un effet bénéfique sur la résistance des bétons de sable face à l'agression alcaline de NaOH.

d. Variation de volume

La Figure V.23 illustre la variation du volume (en %) des bétons de sable à base de cendres de canne en fonction de la durée d'immersion dans une solution d'hydroxyde de sodium à 5% pendant 120 jours.

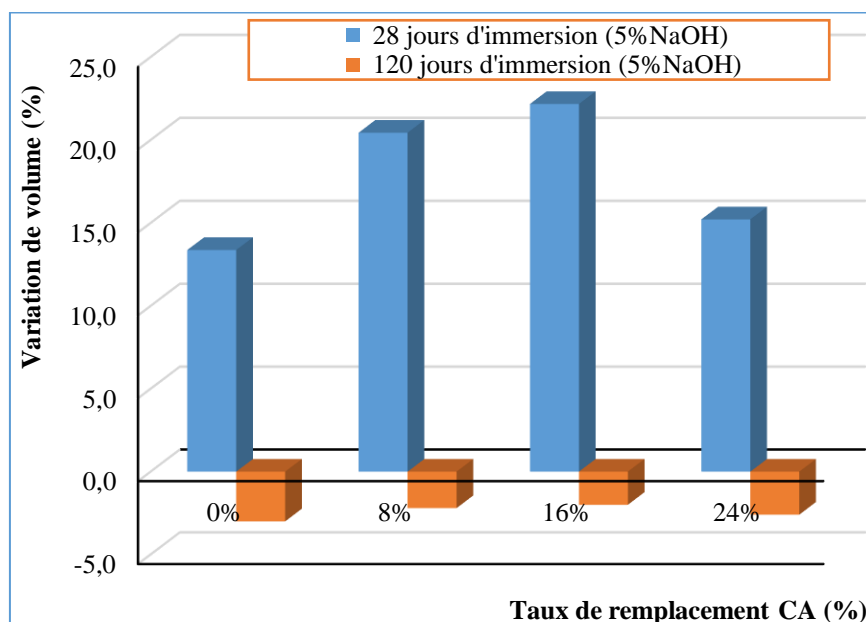


Figure V.23: Variation de volume des bétons de sable à base de cendres de canne à 28 jours et 120 jours d'immersion dans 5% NaOH

A 28 jours, l'ensemble des bétons étudiés ont subi une perte de volume sous l'action de NaOH. Le béton témoin a affiché une perte de volume la plus faible de 13.4% par rapport aux bétons incorporant 8–24% de cendres CA, dont la perte de volume décroît avec l'augmentation du dosage de CA. Les bétons CC8; CC16 et CC24 ont perdu respectivement 20.4%; 22.2% et 15.5% de leur volume.

Toutefois, après 120 jours d'exposition, les bétons CC0; CC8; CC16 et CC24 ont affiché respectivement, un gain de volume (expansion) de 3%; 2.2% ; 2% et 2.6%. Le béton témoin CC0, a enregistré l'expansion la plus élevée. Néanmoins, le béton CC16 a affiché la valeur la plus faible. Ce phénomène indique le début d'un processus de gonflement des bétons, comme le montre l'augmentation de la masse.

Dans cette étude, l'ajout de cendres de canne a entraîné une diminution de l'expansion des bétons de sable, lorsque ceux-ci sont soumis à une attaque alcaline, en comparaison au béton témoin CC0, qui est le plus susceptible. Après 120 jours d'exposition, le mélange CC16 affiche les meilleures performances, suivi des mélanges CC8 et CC24.

Ainsi, les bétons à base de 8-24% de cendres de canne, montrent les meilleures performances face à une attaque alcaline de NaOH.

V.2.4.6. Effet des sulfates de magnésium $MgSO_4$

a. Examen visuel

Tous les spécimens de béton de sable immergés dans la solution de sulfate de magnésium à 5% pendant 120 jours, n'ont montré aucun changement significatif, à l'exception d'une légère décoloration causée par la précipitation des sulfates de magnésium. Les spécimens ont également conservé leur forme et n'ont montré que des altérations mineures le long des bords et coins, ainsi qu'un léger changement de couleur sur leur surface externe, caractérisant le début de la formation du gypse après leur immersion dans la solution sulfatique (Figure V.26 et

Figure V.27). Ces observations expliquent l'accroissement du gain de masse des bétons de sable, notamment entre 56 et 90 jours d'immersion dans la solution sulfatique, et sont en accord avec la littérature (Tian et al., 2023). Selon Neville (2011), le béton affecté par les sulfates se distingue par un aspect blanchâtre. Les dommages commencent généralement aux bords et aux coins, suivis par l'apparition progressive de fissures et d'écaillage qui réduisent le béton à un état friable, voire mou. Dans le cadre de cette étude, aucun ramollissement, ni écaillage n'a été observé durant les essais.

b. Gain de masse

La Figure V.24 présente la variation du gain de masse des bétons de sable à base de cendres de canne en fonction de la durée d'immersion dans une solution de sulfates de magnésium à 5% pendant 120 jours. La cinétique du gain de masse, telle qu'illustrée sur la figure V.24, se révèle pratiquement similaire pour tous les bétons de sable testés, avec une légère prépondérance observée pour le béton témoin CC0, affichant les gains de masse les plus élevés à tous les âges, ce qui engendre un risque d'expansion par rapport aux bétons avec ajout CA. Cela peut s'expliquer par la forte teneur en C_3A dans le béton témoin, ce qui le rend plus vulnérable aux attaques sulfatiques. Le C_3A est reconnu comme le composé réactif responsable de la formation d'ettringite. Des études ont montré que les bétons incorporant des ajouts cimentaires contiennent moins de CaO que les bétons sans ajouts, ce qui entraîne une diminution du C_3A réactif, en raison de la réduction de la quantité de ciments portland ordinaire et de l'augmentation de la proportion de cendres (Alnahhal et al., 2018).

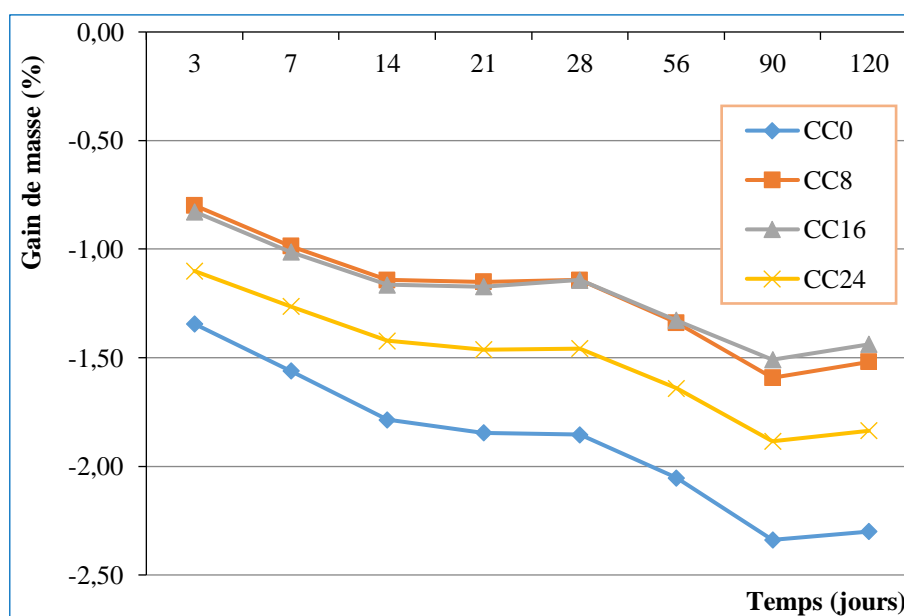


Figure V.24: Gain de masse des bétons de sable à base des cendres de canne (CA) en fonction de la période d'immersion dans 5% $MgSO_4$

On constate une augmentation graduelle du gain de masse en fonction de la durée d'immersion pour les mélanges CC0, CC8, CC16 et CC24 jusqu'à l'âge de 90 jours, atteignant des taux maximaux respectifs de 2.34% ; 1.59% ; 1.51% et 1.88% ; suivi d'une légère diminution à 120 jours d'immersion, en enregistrant les valeurs de 2.30%, 1.52%, 1.44% et 1.84%. Toutefois, les gains de masse demeurent relativement stables entre 21 et 28 jours pour l'ensemble des bétons ; et, les gains de masse des mélange CC8 et CC16 sont presque similaire jusqu'à l'âge de 56 jours. L'accroissement progressif du gain de masse est attribué à la continuité de la formation des hydrates dans les bétons étudiés suite à l'attaque sulfatique, où

les sulfates interagissent avec les différents produits d'hydratation du ciment et non seulement avec le $\text{Ca}(\text{OH})_2$. De plus, la présence d'hydroxyde de magnésium ($\text{Mg}(\text{OH})_2$), un composé très peu soluble doté d'un pH bas, contribue significativement à cette augmentation.

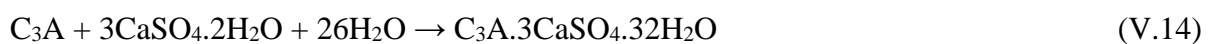
Selon la littérature, les variations de masse des matériaux cimentaires dans une solution sulfatique dépendent de divers processus physiques et chimiques. Ces processus incluent l'hydratation du liant, l'absorption des ions sulfate, le retrait d'eau du béton, ainsi que le lessivage et la désintégration de l'échantillon. Les deux premiers processus entraînent une augmentation de la masse, tandis que les derniers provoquent une diminution. Ce qui explique que durant les premiers jours d'exposition jusqu'à l'âge de 90 jours, l'hydratation et l'absorption des ions sulfates prédominent. Ensuite à 120 jours, les facteurs de diminution de la masse commencent progressivement à s'imposer tel qu'a été constaté par Biricik et al. (2000). Ceci, additivement aux processus de transport, de perméabilité et de diffusion au sein de la matrice cimentaire. Ces caractéristiques de transport sont étroitement liées au réseau poreux, à sa connectivité et à la teneur en solution interstitielle du matériau, ainsi qu'à la structure poreuse de l'ajout aux propriétés pouzzolaniques, comme a été indiqué par Ikumi et Segura (2019).

c. Action de MgSO_4

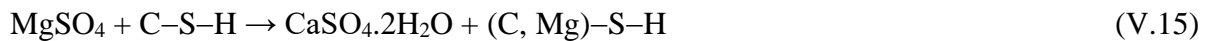
Le mécanisme d'attaque des bétons par les sulfates de magnésium débute généralement par la réaction entre la portlandite et les ions du MgSO_4 qui pénètrent par un phénomène d'absorption provenant de sources externes, ce qui permet la formation de l'hydroxyde de magnésium $\text{Mg}(\text{OH})_2$ (la brucite), qui provoque une diminution de la valeur du pH des solutions de pores et la décalcification du gel C-S-H (Yin et al., 2023), et la formation du gypse à la suite de la même réaction d'où une augmentation du taux d'expansion, comme illustré dans l'équation V.13. L'augmentation de la teneur en gypse favorise la conversion de l'aluminate tricalcique (C_3A) en ettringite, comme le montre l'équation V.14. La formation progressive de l'ettringite, qui est fondamentalement expansive, engendre des contraintes dépassant la capacité de résistance à la traction de la matrice de ciment, ce qui entraîne à son tour des fissures et une diminution de la résistance (Alnahhal et al., 2018). Un remplacement partiel du calcium par du magnésium dans les C-S-H résultera en la formation de silicate de magnésium hydraté (M-S-H) qui est faiblement cohésif, et par conséquent, la pâte hydratée devient molle et incohérente, d'où la perte de l'adhérence entre celle-ci et les particules d'agrégat (équation V.15) causant la perte de résistance du béton et sa détérioration finale. Ainsi, la conséquence critique de l'attaque par les sulfates de magnésium comme indiqué par Neville (2011), est la destruction du C-S-H. La réaction sulfatique se poursuit jusqu'à son achèvement, en raison de la très faible solubilité du $\text{Mg}(\text{OH})_2$, ce qui peut entraîner, dans certaines circonstances, une agression plus sévère par les sulfates de magnésium que par d'autres sulfates. Les produits de sulfate formés sont influencés par les conditions de corrosion, notamment la concentration de la solution, la valeur du pH, la température ambiante et le type de cation (Yin et al., 2023). Ainsi que, les conditions d'essai, la taille des échantillons, et la durée de l'attaque sulfatique (Kanaan et al., 2022).



Sulfates de magnésium + hydroxyde de calcium \rightarrow brucite + gypse



Aluminate tricalcique + gypse \rightarrow ettringite



Sulfates de magnésium + gel C-S-H → gypse + silicate de magnésium hydraté

Dans notre étude, l'incorporation des cendres de canne en tant qu'ajout cimentaire renforce la résistance des bétons de sable en termes de gain de masse face à l'attaque sulfatique par MgSO_4 . Cette amélioration est attribuée aux propriétés pouzzolaniques des cendres de canne qui ont affiné la porosité et densifié la matrice. La performance des cendres CA dépend du taux de remplacement, de l'exposition aux ions sulfate et de leurs propriétés chimiques et physiques comme a été indiqué par Elahi et al. (2021). Des auteurs ont montré que les ajouts cimentaires peuvent réduire de manière proportionnelle les teneurs en C_3A , ce qui limite la formation des hydrates d'aluminates réactifs avec les sulfates extérieurs dans le système. Au fur et à mesure que l'hydratation se poursuit, les ajouts consommeront davantage de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ et produiront du C-S-H en raison de leur réaction pouzzolanique, réduisant ainsi la disponibilité du $\text{Ca}(\text{OH})_2$ pour réagir avec les sulfates externes pour former du gypse ou pour lessiver le calcium afin de former de l'ettringite secondaire et contribue à l'amélioration de la structure des pores des bétons durcis à base d'ajout pour un béton dense et peu perméable que possible (Neville, 2011; Alnahhal et al., 2018; Elahi et al., 2021). Ces résultats concordent avec ceux obtenus par Mohammad hosseini et al. (2021), et sont également en adéquation avec les travaux de Gadikota et Chandra (2023) qui ont observé que le béton contenant des ajouts cimentaires présentait une bonne résistance dans un environnement chimiquement agressif à base de sulfate de magnésium sur une période d'attaque de 150 jours, et qu'il était plus durable que le béton conventionnel.

En conséquence, l'incorporation des cendres de canne (CA) dans le béton da sable réduit le gain de masse et par conséquent l'expansion du béton par rapport au béton sans ajout. A court et moyen terme (jusqu'à 28 jours), le mélange CC8 se révèle être le plus performant en affichant les valeurs les plus faibles en termes de gain de masse. Toutefois, à long terme (à partir de 56 jours), c'est le CC16 qui montre les meilleures performances, suivi par le CC8. Ainsi, les bétons incorporant des cendres de canne ont montré une meilleure résistance à l'attaque sulfatique que le béton sans ajout (le témoin) en termes de gain de masse, enregistrant les taux de gain de masse de 1.44–2.30% à 120 jours d'exposition.

d. Variation de volume

La Figure V.25 illustre l'effet des cendres de canne en tant qu'ajout cimentaire sur la variation de volume des bétons de sable immergés dans une solution contenant 5% de sulfate de magnésium.

A 28 jours d'exposition, on observe une réduction de volume des bétons CC0, CC8, CC16 et CC24, affichant les valeurs respectives de 15.8%, 8.2%, 15.8% et 6.1%. Cette réduction de volume peut être attribuée au retrait endogène des bétons étudiés au début du processus de l'attaque sulfatique. Ce retrait est causé par une hydratation supplémentaire du ciment et des réactions pouzzolaniques des cendres de canne, comme a été indiqué par Cang et al. (2017).

A 120 jours d'exposition, une expansion a été observée pour l'ensemble des bétons étudiés, dont le taux varie entre 1–1.7%, qui était particulièrement marqué pour le béton témoin CC0 en affichant l'expansion la plus élevée de 1.7%, par rapport aux bétons contenant les cendres CA (CC8, CC16 et CC24). Le béton CC16 a affiché le taux d'expansion le plus faible de 1%, ce qui correspond également à un gain de masse minimal à 120 jours, suivi par les mélanges

CC8 et le CC24 avec des valeurs respectives de 1.3% et 1.5%. Cette expansion peut être expliquée par le fait que lorsque la solution de sulfate de magnésium pénètre dans la matrice cimentaire, elle engendre une agression chimique en interagissant avec les hydrates, qui résulte en la formation du gypse et de l'ettringite qui remplissent les pores internes menant à l'expansion des bétons à 120 jours (Ikumi et Segura, 2019), bien que leurs spécimens aient conservé leur forme intacte, en raison des contraintes internes d'expansion générées, qui pourraient ne pas être suffisantes pour provoquer l'apparition des fissures d'expansion (Tian et al., 2023).

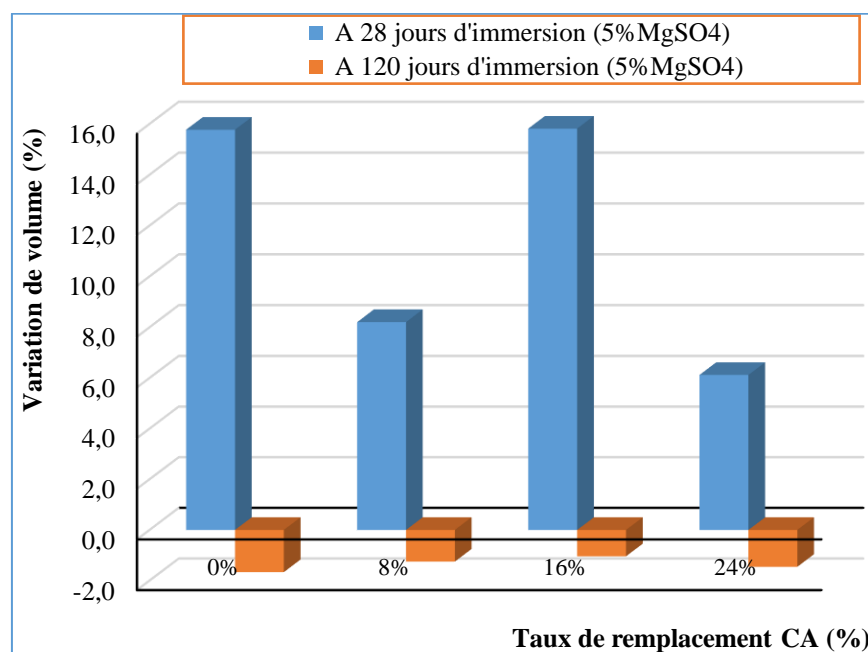


Figure V.25: Variation de volume des bétons de sable à base de cendres de canne à 28 jours et 120 jours d'immersion dans 5% MgSO₄

Yin et al. (2023) ont mentionné que la formation de gypse à partir des ions sulfate et calcium, issus de la dissolution du calcium solide (hydroxyde de calcium et gel C-S-H), entraîne également une expansion du volume du béton. Ils ont ajouté qu'en raison de l'existence de pores capillaires dans le béton, les produits de sulfate remplissent d'abord l'espace des pores. Toutefois, un grand nombre d'observations au MEB sur la microstructure du béton endommagé par les attaques sulfatiques ont révélé que les produits de sulfate tels que le gypse et l'ettringite ne comblent pas l'intégralité des pores fissurés. En d'autres termes, même si les pores sont partiellement remplis, la génération continue de produits de sulfate entraîne une expansion volumique du béton. De plus, selon la littérature, au-delà d'un certain âge la formation de ces produits expansifs cause la destruction de la pâte de ciment durcie et sa fissuration (Charitha et al., 2021)

Ainsi, l'incorporation des cendres de canne a engendré une réduction de l'expansion des bétons de sable, exposés à l'attaque des sulfates de magnésium, par rapport au béton témoin CC0, qui se révèle être le plus vulnérable. Le mélange CC16 présente la meilleure performance après 120 jours d'immersion dans la solution sulfatique, suivi par les mélanges CC8 et le CC24. Ces résultats concordent avec la littérature publiée, notamment celles se rapportant aux agro-ciments (Pandey et Kumar, 2022).

En conséquence, les bétons de sable à base de 8–24 % de cendres de canne (CA), s'avèrent être plus durable que le béton de sable (100% CEMI), en termes de perte de masse et de

variation de volume, lorsqu'ils sont exposés à un environnement agressif à base de sulfates de magnésium à 5% pendant une durée de 120 jours. L'incorporation de l'ajout cimentaire CA est particulièrement avantageuse pour la construction dans les régions côtières, comme le souligne Alnahhal et al., 2018.

*Etat des éprouvettes après attaques chimiques

Les Figures V.26 et V.27 illustrent l'état des éprouvettes après les attaques chimiques.

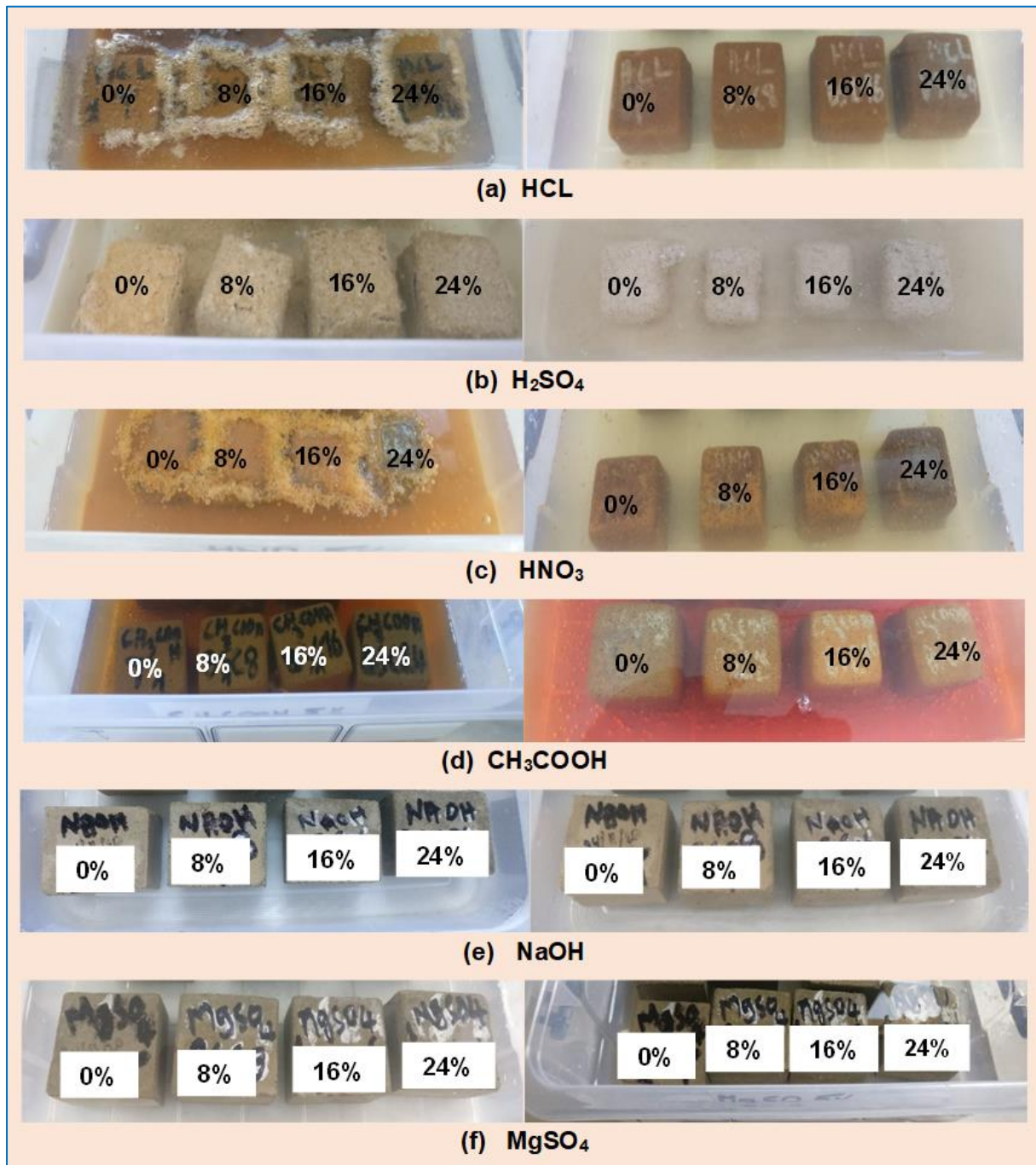


Figure V.26: Spécimens de béton de sable à base de cendres de canne (CA) après 105 jours d'exposition aux solutions d'attaque chimiques



Figure V.27: Aspects des spécimens des bétons de sable à base de cendres de canne après 28 et 120 jours d'exposition aux solutions d'attaque chimiques

V.3. Conclusion

Le but de ce chapitre est d'évaluer l'influence de l'ajout des cendres de canne (CA) sur les paramètres de durabilité des bétons de sable, en termes d'absorption capillaire et par immersion, de pénétration des chlorures, ainsi que de résistance aux diverses agressions chimiques causées par les acides HCL, H₂SO₄, HNO₃, CH₃COOH; les bases (NaOH) et les sulfates (MgSO₄) à 5% de concentration pendant 120 jours. Cette évaluation se base sur l'interprétation des résultats des essais réalisés dans le cadre de cette étude, permettant ainsi d'en tirer les conclusions suivantes:

- L'ajout 8-24% CA augmente l'absorption par immersion, l'absorption capillaire et la sorptivité des bétons de sable, par rapport au béton témoin qui enregistre les valeurs les plus faibles. Néanmoins, les performances de ces propriétés sont acceptables à long terme, en raison de la réaction pozzolanique lente de CA qui améliore le réseau poreux,
- Les bétons contenant 8% et 24% CA sont les plus performants face à l'attaque par les chlorures à 120 jours, réduisant ainsi le taux de corrosion des barres d'armature en acier. La densité des bétons avec 8–24% CA est plus grande que celle du béton témoin avant et après l'exposition aux chlorures, et le taux 8% CA affiche les valeurs optimales,
- A court et à moyen terme, le béton témoin CC0, résiste mieux à l'attaque par l'acide HCL que les bétons contenant l'ajout CA. A long terme, le taux de 8% CA, améliore la résistance chimique des bétons de sable. Le béton avec 24% CA est le plus vulnérable, en perdant 49.65% de sa masse et 60% de son volume, suivi du CC16, mais qui reste relativement proche du comportement du béton témoin,
- La proportion de 8–24% CA, a un effet bénéfique sur la variation de volume du béton de sable exposé à l'acide HCL, en enregistrant une amélioration d'environ 3.6–6.7% après 120 jours d'exposition,
- Le béton CC24 est le plus durable face à l'acide H_2SO_4 . A court et à moyen termes, le béton CC16 est le plus vulnérable face à cette agression. Toutefois, à long terme, le béton CC8 a subi l'attaque la plus sévère, en perdant 94.92% de sa masse et 97.1% de son volume, après 120 jours d'exposition, suivi du béton CC16. De plus, les dosages élevés des cendres CA augmentent la résistance des bétons de sable contre l'agression de l'acide H_2SO_4 ,
- Le béton témoin CC0 est le plus résistant face à l'agression par l'acide HNO_3 durant toute la période d'exposition de 120 jours, suivi du béton CC8. Le béton CC16 est le plus vulnérable à cette attaque durant les 90 jours d'exposition; cependant, à 120 jours d'attaque, le béton CC24 est le plus susceptible en perdant 67.56% de sa masse et 72.5 % de son volume,
- A court et à moyen terme, les bétons contenant 8–24% CA résistent mieux à l'attaque par l'acide acétique, en comparaison avec le béton témoin qui est le plus affecté. A long terme, le béton témoin est le plus résistant, suivi du béton CC8. Néanmoins, le béton CC16 est le plus vulnérable, perdant 74.88% de sa masse et 81.7% de son volume, après 120 jours d'exposition.
- La proportion de 8–24% CA renforce la résistance des bétons de sable face à l'attaque de l'hydroxyde de sodium, le béton CC16 est le plus performant. Tandis que, le béton témoin est le plus altérable, avec des niveaux d'expansion les plus élevées à tous les âges,
- L'incorporation de 8–24% CA renforce la résistance des bétons de sable à l'attaque sulfatique par $MgSO_4$, qui est particulièrement avantageuse pour la construction dans les régions côtières. Le béton témoin est le plus vulnérable à tous les âges. A court et à moyen termes, le béton CC8 est le plus performant, tandis qu'à long terme, c'est le béton CC16 qui est le plus durable.

Conclusion générale

Recommandations & perspectives

Conclusions générales et perspectives

Ce travail de thèse, a exploré l'utilisation potentielle d'une proportion de 0–24% de cendres de déchets de canne (CA) non traitées en remplacement partiel du ciment portland CEMI pour produire un béton de sable durable et écologique, en évaluant les effets de l'ajout sur les propriétés du béton. Les conclusions suivantes ont été tirées de l'étude expérimentale:

-Les propriétés physico-chimique et morphologique de CA, classifie le matériau de type pouzzolanique en classe F selon la norme ASTM C618-19, et démontre que ce dernier peut être utilisé comme ajout cimentaire en remplacement du ciment CEMI pour la production du béton de sable.

-A l'état frais, un taux de 8-16% CA améliore l'ouvrabilité du béton de sable, ce qui est avantageux pour son application dans divers types de coffrage.

-A l'état durci :

- Les bétons de sable contenant 0-24% CA présentent des performances mécaniques intéressantes en compression ainsi qu'en traction par flexion, ce qui permet leur utilisation dans la production d'éléments en béton armé et pour des applications structurelles. Un taux de 8% CA confère des avantages pour les bétons nécessitant une résistance élevée au jeune âge et un décoffrage immédiat.
- La proportion de 8-24% CA augmente la densité du béton de sable, le situant dans la catégorie des agro-ciments avec une variation de densité de 1800–2100 kg/m³, et le taux de 8% CA fournit les performances optimales.
- L'incorporation de 8–24% CA améliore le module d'élasticité du béton de sable, avec un taux de 8% CA affichant la meilleure performance. Néanmoins, le béton témoin a présenté la valeur la plus faible.
- L'ajout de 8-24% CA préserve la qualité du béton de sable, avec un dosage optimal de 8% CA qui améliore son homogénéité et sa compacité. La dureté d'impact et la résistance par la méthode combinée diminuent avec l'augmentation du dosage de CA, les meilleures performances sont obtenues par le béton témoin, suivi du taux de 8% CA, dont les résistances sont presque comparables.
- Une bonne relation de corrélation a été établie entre les divers paramètres examinés, et leurs formules de corrélation serviront d'outil pratique de prévision ou d'estimation lorsque l'une de leurs valeurs est disponible.

-Une caractérisation plus approfondie des bétons de sable par l'analyse de leur microstructure, a été réalisée par DRX et par MEB/EDAX, qui a montré une amélioration de la microstructure du béton de sable contenant 8% CA, devenue plus dense et compacte que le béton témoin, en raison de l'effet filler et pouzzolanique.

- L'effet de l'ajout CA sur les paramètres de durabilité dans différents environnements, incluant les conditions hydriques et agressives telles que les acides, les bases, les chlorures, et les sulfates à 5% de concentration dans des conditions d'immersion totale pendant 120 jours d'exposition, nous a permis de formuler les conclusions suivantes:

- La proportion 8-24% CA entraîne une augmentation de l'absorption par immersion, de l'absorption capillaire et de la sorptivité des bétons de sable, par rapport au béton témoin qui affiche les valeurs les plus faibles. A long terme, les performances de ces propriétés sont acceptables et comparables à ceux de la plupart des matériaux de construction.
- Les taux de 8% et 24% CA renforce la résistance des bétons de sable face à l'attaque par les chlorures à 120 jours, réduisant ainsi le taux de corrosion des barres d'armature en acier. La densité des bétons avec 8-24% CA est plus grande que celle du béton témoin avant et après l'exposition aux chlorures, et le taux 8% CA affiche les valeurs optimales.
- A court et à moyen terme, le béton témoin CC0 résiste mieux à l'attaque par l'acide HCL que les bétons contenant l'ajout CA. A long terme, le béton CC8 est le plus durable, tandis que, le béton CC24 est le plus altérable. La proportion 8-24% CA, a un effet bénéfique sur la variation de volume du béton de sable exposé à l'acide HCL.
- Le béton CC24 montre un comportement favorable face à l'acide H_2SO_4 , et est considéré comme le plus durable pendant la toute la période d'exposition de 120 jours. Le béton CC16 est le plus vulnérable, à court et moyen termes. Cependant, à long terme, le béton CC8 a été le plus sévèrement attaqué. De plus, les dosages élevés des cendres CA augmentent la résistance des bétons de sable contre l'agression de l'acide H_2SO_4 .
- Le béton témoin CC0 et le CC8 sont les plus durables face à l'agression par l'acide HNO_3 pendant toute la durée de l'exposition. Tandis que le CC24 et le CC16 sont les plus vulnérables à cette attaque.
- A court et à moyen terme, les bétons contenant 8-24% CA résistent mieux à l'attaque par l'acide acétique, en comparaison au béton témoin qui est le plus affecté. A long terme, le béton témoin se révèle le plus durable, suivi du béton CC8. Tandis que le béton CC16 est le plus vulnérable, perdant 74.88% de sa masse et 81.7% de son volume, après 120 jours d'exposition..
- Les bétons contenant 8-24% CA présentent de meilleures performances que le béton témoin sans ajout lorsqu'ils sont exposés à l'hydroxyde de sodium (5% NaOH).
- La proportion de 8-24% CA réduit l'expansion et renforce la résistance des bétons de sable à l'attaque sulfatique par $MgSO_4$, ce qui est particulièrement avantageux pour la construction dans les régions côtières. Le béton témoin est le plus vulnérable à tous les âges, tandis que le béton CC16 présente les meilleures performances à long terme.

Les résultats de la recherche indiquent que l'incorporation de 0-24 % de cendres de canne au béton de sable, semblent être une voie prometteuse pour produire des matériaux de construction économiques et écologiques. Cette démarche, qui s'inscrit dans le cadre du développement durable, pourrait offrir des avantages significatifs à la fois en termes de coûts ainsi que sur les aspects de durabilité et d'impact environnemental positif par la valorisation des déchets agricoles.

***Recommandations & Perspectives**

La recherche a permis de répondre à certaines questions et d'identifier des points intéressants à explorer à l'avenir, afin de mieux appréhender les différents aspects du comportement des bétons de sable à base de cendres de canne, tels que:

- L'étude de retrait du béton de sable à base de cendres de canne.
- L'étude de la durabilité des bétons de sable à base de cendres de canne à long terme (plus de 360 jours).
- Approfondir le comportement du béton de sable à base de cendres de canne du point de vue durabilité pour les paramètres suivants:
 - ✓ Etude des caractéristiques thermiques,
 - ✓ Etude de la durabilité vis-à-vis de la corrosion,
 - ✓ Etude de la résistance au gel/dégel,
- Etude des caractéristiques de la microstructure vis-à-vis des attaques par les acides, les sulfates et de l'hydroxyde de sodium afin de comprendre le comportement du béton de sable à base de cendres dans ces milieux agressifs.
- Etendre le thème de recherche à d'autres ajouts cimentaires binaires et ternaires (combinaison des cendres de canne avec d'autres ajouts) pour l'amélioration et l'optimisation de certains résultats obtenus.
- Formuler un béton de sable à base de cendres de canne avec des granulats afin de donner naissance à un béton de sable chargé.
- Des études supplémentaires sont recommandées pour explorer les effets de l'augmentation de la finesse de ces cendres dans le béton.

Finalement, les formulations étudiées qui ont montrés des résultats performants par rapport au béton sans ajout, méritent d'être mises en œuvre à grande échelle dans des domaines spécifiques.

Références

Bibliographiques

Références bibliographiques

- ACI Committee 130. (2019). *Report on the Role of Materials in Sustainable Concrete Construction (ACI 130R-19)*. Provided by IHS Markit under license with ACI Licensee. <https://www.GigaPaper.ir>.
- Adesanya, D., & Raheem, A. (2010). A study of the permeability and acid attack of corn cob ash blended cements. *Construction & Building Materials*, 24(3), 403–409. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.02.001>
- Agwa, I. S., Zeyad, A. M., Tayeh, B. A., Adesina, A., De Azevedo, A. R., Amin, M., & Hadzima-Nyarko, M. (2022). A comprehensive review on the use of sugarcane bagasse ash as a supplementary cementitious material to produce eco-friendly concretes. *Materials Today: Proceedings*, 65, 688–696. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.03.264>
- Ahsan, M. B., & Hossain, Z. (2018). Supplemental use of rice husk ash (RHA) as a cementitious material in concrete industry. *Construction & Building Materials*, 178, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.101>
- Akkarapongtrakul, A., Julphunthong, P., & Nochaiya, T. (2017). Setting time and microstructure of Portland cement-bottom ash–sugarcane bagasse ash pastes. *Monatshefte Für Chemie*, 148(7), 1355–1362. <https://doi.org/10.1007/s00706-017-1953-5>
- Al-Hdabi, A. (2016). Laboratory investigation on the properties of asphalt concrete mixture with Rice Husk Ash as filler. *Construction & Building Materials*, 126, 544–551. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.09.070>
- Ahsan, M. B., & Hossain, Z. (2018). Supplemental use of rice husk ash (RHA) as a cementitious material in concrete industry. *Construction & Building Materials*, 178, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.101>
- Aliques-Granero, J., Tognonvi, T. M., & Tagnit-Hamou, A. (2016). Durability test methods and their application to AAMs: case of sulfuric-acid resistance. *Materials And Structures*, 50(1). <https://doi.org/10.1617/s11527-016-0904-7>
- Al-Mulali, M. Z., Awang, H., Khalil, H. A., & Aljournaily, Z. S. (2015). The incorporation of oil palm ash in concrete as a means of recycling: A review. *Cement & Concrete Composites*, 55, 129–138. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.09.007>
- Alnahhal, M. F., Alengaram, U. J., Jumaat, M. Z., Alsubari, B., Alqedra, M. A., & Mo, K. H. (2018). Effect of aggressive chemicals on durability and microstructure properties of concrete containing crushed new concrete aggregate and non-traditional supplementary cementitious materials. *Construction & Building Materials*, 163, 482–495. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.106>
- Alsubari, B., Shafigh, P., Ibrahim, Z., Alnahhal, M. F., & Jumaat, M. Z. (2018). Properties of eco-friendly self-compacting concrete containing modified treated palm oil fuel ash. *Construction & Building Materials*, 158, 742–754. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.174>
- Al-Swaidani, A. M. (2021). Natural pozzolana of micro and nano-size as cementitious additive: resistance of concrete/mortar to chloride and acid attack. *Cogent Engineering*, 8(1). <https://doi.org/10.1080/23311916.2021.1996306>

- Amin, M. N., Murtaza, T., Shahzada, K., Khan, K., & Adil, M. (2019). Pozzolanic Potential and Mechanical Performance of Wheat Straw Ash Incorporated Sustainable Concrete. *Sustainability*, *11*(2), 519. <https://doi.org/10.3390/su11020519>
- Ammari, M. S., Bederina, M., Belhadj, B., & Merrah, A. (2020). Effect of steel fibers on the durability properties of sand concrete with barley straws. *Construction & Building Materials*, *264*, 120689. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120689>
- Aprianti, E., Shafigh, P., Bahri, S., & Farahani, J. N. (2015). Supplementary cementitious materials origin from agricultural wastes – A review. *Construction & Building Materials*, *74*, 176–187. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.10.010>
- Arel, H. A., & Aydin, E. (2018). Use of Industrial and Agricultural Wastes in Construction Concrete. *ACI Materials Journal*, *115*(1). <https://doi.org/10.14359/51700991>
- Arenas-Piedrahita, J., Montes-García, P., Mendoza-Rangel, J., Calvo, H. L., Valdez-Tamez, P., & Martínez-Reyes, J. (2016). Mechanical and durability properties of mortars prepared with untreated sugarcane bagasse ash and untreated fly ash. *Construction & Building Materials*, *105*, 69–81. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.047>
- Ataie, F. F., & Riding, K. A. (2016). Influence of agricultural residue ash on early cement hydration and chemical admixtures adsorption. *Construction & Building Materials*, *106*, 274–281. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.091>
- Athira, V., Charitha, V., Athira, G., & Bahurudeen, A. (2021). Agro-waste ash based alkali-activated binder: Cleaner production of zero cement concrete for construction. *Journal of Cleaner Production*, *286*, 125429. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125429>
- Ayobami, A. B. (2021). Performance of wood bottom ash in cement-based applications and comparison with other selected ashes: Overview. *Resources, Conservation and Recycling*, *166*, 105351. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105351>
- Bahurudeen, A., Kanraj, D., Dev, V. G., & Santhanam, M. (2015). Performance evaluation of sugarcane bagasse ash blended cement in concrete. *Cement & Concrete Composites*, *59*, 77–88. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2015.03.004>
- Balagopal, V., & Viswanathan, V. T. (2020). Evaluation of Mechanical and Durability Performance of Coir Pith Ash Blended Cement Concrete. *Civil Engineering and Architecture*, *8*(5), 1028–1038. <https://doi.org/10.13189/cea.2020.080529>
- Bahurudeen, A., & Santhanam, M. (2015). Influence of different processing methods on the pozzolanic performance of sugarcane bagasse ash. *Cement & Concrete Composites*, *56*, 32–45. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.11.002>
- Belhadj, B., Bederina, M., Makhoulfi, Z., Dheilly, R., Montrelay, N., & Quéneudéc, M. (2016). Contribution to the development of a sand concrete lightened by the addition of barley straws. *Construction & Building Materials*, *113*, 513–522. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.067>
- Benaissa, A., Morlier, P., & Viguier, C. (1993). Microstructure du béton de sable. *Cement and Concrete Research*, *23*(3), 663–674. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(93\)90017-4](https://doi.org/10.1016/0008-8846(93)90017-4)
- Benosman, A., Mouli, M., Taïbi, H., Belbachir, M., & Senhadji, Y. (2011). Resistance of Polymer (PET) - Mortar Composites to Aggressive Solutions. *International Journal of Engineering Research in Africa*, *5*, 1–15. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/jera.5.1>

- Bheel, N., Ibrahim, M. H. W., Adesina, A., Kennedy, C., & Shar, I. A. (2020). Mechanical performance of concrete incorporating wheat straw ash as partial replacement of cement. *Journal of Building Pathology and Rehabilitation*, 6(1). <https://doi.org/10.1007/s41024-020-00099-7>
- Biricik, H., Aköz, F., Türker, F., & Berktaş, I. (2000). Resistance to magnesium sulfate and sodium sulfate attack of mortars containing wheat straw ash. *Cement and Concrete Research*, 30(8), 1189–1197. [https://doi.org/10.1016/s0008-8846\(00\)00314-8](https://doi.org/10.1016/s0008-8846(00)00314-8)
- Blesson, S., & Rao, A. U. (2023). Agro-industrial-based wastes as supplementary cementitious or alkali-activated binder material: a comprehensive review. *Innovative Infrastructure Solutions*, 8(4). <https://doi.org/10.1007/s41062-023-01096-8>
- Brás, A., Leal, M., & Faria, P. (2013). Cement-cork mortars for thermal bridges correction. Comparison with cement-eps mortars performance. *Construction & Building Materials*, 49, 315–327. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.08.006>
- Cang, S., Ge, X., & Bao, Y. (2017). Assessment of Mechanical Properties and Damage of High-Performance Concrete Subjected to Magnesium Sulfate Environment. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2017, 1–12. <https://doi.org/10.1155/2017/9196187>
- Chandra Paul, S. C., Mbewe, P., Kong, S., & Šavija, B. (2019). Agricultural Solid Waste as Source of Supplementary Cementitious Materials in Developing Countries. *Materials*, 12(7), 1112. <https://doi.org/10.3390/ma12071112>
- Charime, R., Abdelouahed, A., Hebhouh, H., Belachia, M., & Messaoudi, K. (2024). Mechanical, durability and microstructure properties of eco-friendly sand concrete incorporating cane ash. *Journal of Building Engineering*, 86, 108801. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.108801>
- Charitha, V., Athira, V., Jittin, V., Bahurudeen, A., & Nanthagopalan, P. (2021). Use of different agro-waste ashes in concrete for effective upcycling of locally available resources. *Construction & Building Materials*, 285, 122851. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122851>
- Chatveera, B., & Lertwattanaruk, P. (2014). Evaluation of nitric and acetic acid resistance of cement mortars containing high-volume black rice husk ash. *Journal of Environmental Management*, 133, 365–373. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.12.010>
- Chatveera, B., & Lertwattanaruk, P. (2011). Durability of conventional concretes containing black rice husk ash. *Journal of Environmental Management*, 92(1), 59–66. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2010.08.007>
- Chatveera, B., & Lertwattanaruk, P. (2009). Evaluation of sulfate resistance of cement mortars containing black rice husk ash. *Journal of Environmental Management*, 90(3), 1435–1441. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2008.09.001>
- Chindaprasirt, P., Homwuttiwong, S., & Sirivivatnanon, V. (2004). Influence of fly ash fineness on strength, drying shrinkage and sulfate resistance of blended cement mortar. *Cement and Concrete Research*, 34(7), 1087–1092. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2003.11.021>
- Chinnu, S., Minnu, S., Bahurudeen, A., & Senthilkumar, R. (2021). Reuse of industrial and agricultural by-products as pozzolan and aggregates in lightweight concrete. *Construction & Building Materials*, 302, 124172. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124172>

- Chopperla, S. T., Yamuna, V., Bahurudeen, A., Santhanam, M., & Gopinath, A. (2019). Durability of concrete with agro-waste: a local approach to sustainability. *Green Materials*, 7(2), 84–96. <https://doi.org/10.1680/jgrma.18.00005>
- Chusilp, N., Jaturapitakkul, C., & Kiattikomol, K. (2009). Effects of LOI of ground bagasse ash on the compressive strength and sulfate resistance of mortars. *Construction & Building Materials*, 23(12), 3523–3531. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.06.046>
- Chusilp, N., Jaturapitakkul, C., & Kiattikomol, K. (2009). Utilization of bagasse ash as a pozzolanic material in concrete. *Construction & Building Materials*, 23(11), 3352–3358. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.06.030>
- Cordeiro, G. C., & Sales, C. P. (2016). Influence of calcining temperature on the pozzolanic characteristics of elephant grass ash. *Cement & Concrete Composites*, 73, 98–104. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2016.07.008>
- Cordeiro, G., Filho, R. T., Tavares, L., & Fairbairn, E. (2012). Experimental characterization of binary and ternary blended-cement concretes containing ultrafine residual rice husk and sugar cane bagasse ashes. *Construction & Building Materials*, 29, 641–646. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.08.095>
- Cordeiro, G. C., Filho, R. D. T., Tavares, L. M., De Moraes Rego Fairbairn, E., & Hempel, S. (2011). Influence of particle size and specific surface area on the pozzolanic activity of residual rice husk ash. *Cement & Concrete Composites*, 33(5), 529–534. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.02.005>
- Da Silva Andrade Neto, J., De França, M. J. S., De Amorim Júnior, N. S., & Ribeiro, D. V. (2021). Effects of adding sugarcane bagasse ash on the properties and durability of concrete. *Construction & Building Materials*, 266, 120959. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120959>
- Delgado, J. M. P. Q., Berenguer, R., Lima, N., Valdés, A. C., Medeiros, M. H. F., Azevedo, A. C., & Lima, N. B. D. (2021). Influence of the Addition of Sugar Cane Bagasse Ash on Durability of Concrete Structures. In *Building pathology and rehabilitation* (pp. 115–171). https://doi.org/10.1007/978-3-030-62825-3_8
- Djerfaj, N., Nafa, Z., & Belaidi, A. S. E. (2023). Durability of high-performance concrete to an attack by a mixture of sulfuric acid and acetic acid. *Epitoanyag-Journal of Silicate Based and Composite Materials*, 75(1). <https://doi.org/10.14382/epitoanyag-jsbcm.2023.01>
- Elahi, M. M. A., Shearer, C. R., Reza, A. N. R., Saha, A. K., Khan, M. N. N., Hossain, M. M., & Sarker, P. K. (2021). Improving the sulfate attack resistance of concrete by using supplementary cementitious materials (SCMs): A review. *Construction and Building Materials*, 281, 122628. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122628>
- Elfordy, S., Lucas, F., Tancret, F., Scudeller, Y., & Goudet, L. (2008). Mechanical and thermal properties of lime and hemp concrete (“hemcrete”) manufactured by a projection process. *Construction & Building Materials*, 22(10), 2116–2123. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.07.016>
- Embong, R., Shafiq, N., Kusbiantoro, A., & Nuruddin, M. F. (2016). Effectiveness of low-concentration acid and solar drying as pre-treatment features for producing pozzolanic sugarcane bagasse ash. *Journal of Cleaner Production*, 112, 953–962. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.066>

- Fadele, O., & Otieno, M. (2022). Utilisation of supplementary cementitious materials from agricultural wastes: a review. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers. Construction Materials*, 175(2), 65–71. <https://doi.org/10.1680/jcoma.19.00098>
- Fadele, O. A., & Otieno, M. (2022). Early-age effect of corn cob ash as a partial replacement for Portland cement in concrete. *MATEC Web of Conferences*, 364, 02011. <https://doi.org/10.1051/mateccconf/202236402011>
- Fairbairn, E. M., Americano, B. B., Cordeiro, G. C., Paula, T. P., Filho, R. D. T., & Silvano, M. M. (2010). Cement replacement by sugar cane bagasse ash: CO₂ emissions reduction and potential for carbon credits. *Journal of Environmental Management*, 91(9), 1864–1871. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2010.04.008>
- Fan, Y. F., Luan, H. Y., & Zhang, S. Y. (2012). Multiscale Investigation of Porosity Characteristic in Concrete Exposed to Acidic Environment. *International Journal of Corrosion*, 2012, 1–9. <https://doi.org/10.1155/2012/923010>
- Fapohunda, C., Kilani, A., Adigo, B., Ajayi, L., Famodimu, B., Oladipupo, O., & Jeje, A. (2021). A Review of Some Agricultural Wastes in Nigeria for Sustainability in the Production of Structural Concrete. *Nigerian Journal of Technological Development*, 18(2), 76–87. <https://doi.org/10.4314/njtd.v18i2.1>
- Ferrándiz-Mas, V., Bond, T., García-Alcocel, E., & Cheeseman, C. (2014). Lightweight mortars containing expanded polystyrene and paper sludge ash. *Construction & Building Materials*, 61, 285–292. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.03.028>
- Ferraro, R. M., & Nanni, A. (2012). Effect of off-white rice husk ash on strength, porosity, conductivity and corrosion resistance of white concrete. *Construction & Building Materials*, 31, 220–225. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.12.010>
- Frías-Rojas, M., Sánchez-De-Rojas-Gómez, M. I., Medina-Martínez, C., & Villar-Cociña, E. (2017). New trends for nonconventional cement-based materials. In *Elsevier eBooks* (pp. 165–183). <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-102001-2.00007-3>
- Gadikota, C. R., & Chandra, D. S. (2023). Influence of marine environment on durability and microstructural properties of fly ash-based geopolymer concrete. *Journal of Building Pathology and Rehabilitation*, 8(2). <https://doi.org/10.1007/s41024-023-00339-6>
- Ganesan, K., Rajagopal, K., & Thangavel, K. (2007). Evaluation of bagasse ash as supplementary cementitious material. *Cement & Concrete Composites*, 29(6), 515–524. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2007.03.001>
- Garrett, T. D., Cardenas, H. E., & Lynam, J. G. (2020). Sugarcane bagasse and rice husk ash pozzolans: Cement strength and corrosion effects when using saltwater. *Current Research in Green and Sustainable Chemistry*, 1–2, 7–13. <https://doi.org/10.1016/j.crgsc.2020.04.003>
- Gay, H., Meynet, T., & Colombani, J. (2016). Local study of the corrosion kinetics of hardened Portland cement under acid attack. *Cement and Concrete Research*, 90, 36–42. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2016.09.007>
- Gbadeyan, O. J., Sibiya, L., Mpongwana, N., Liganiso, L. Z., Liganiso, E. C., & Deenadayalu, N. (2023). Manufacturing of building materials using agricultural waste (sugarcane bagasse ash) for sustainable construction: towards a low carbon economy. A review. *International Journal of Sustainable Engineering*, 16(1), 368–382. <https://doi.org/10.1080/19397038.2023.2283545>

- Goyal, S., Kumar, M., Sidhu, D. S., & Bhattacharjee, B. (2009). Resistance of Mineral Admixture Concrete to Acid Attack. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 7(2), 273–283. <https://doi.org/10.3151/jact.7.273>
- Gunarani, G. I., & Chakkavarthy, S. P. (2017). Experimental studies on effect of Date Seed Ash (DSA) on strength properties of cement sand mortar. *IOP Conference Series. Earth and Environmental Science*, 80, 012015. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/80/1/012015>
- Gunasekaran, K., Annadurai, R., & Kumar, P. (2013). Plastic shrinkage and deflection characteristics of coconut shell concrete slab. *Construction & Building Materials*, 43, 203–207. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.02.019>
- Gunasekaran, K., Annadurai, R., & Kumar, P. (2012). Long term study on compressive and bond strength of coconut shell aggregate concrete. *Construction & Building Materials*, 28(1), 208–215. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.08.072>
- Gupta, R. K., Hassan, A., & Kumar, S. (2020). The Investigation of the Corrosive Effects of Sulphates and Salts on the Concrete and the Study of Environmental Changes on it. *Journal of Cement Based Composites*, 1(2), 1–5. <https://doi.org/10.36937/cebacom.2020.002.001>
- Gursel, A. P., Maryman, H., & Ostertag, C. (2016). A life-cycle approach to environmental, mechanical, and durability properties of “green” concrete mixes with rice husk ash. *Journal of Cleaner Production*, 112, 823–836. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.06.029>
- Hakeem, I. Y., Agwa, I. S., Tayeh, B. A., & Abd-Elrahman, M. H. (2022). Effect of using a combination of rice husk and olive waste ashes on high-strength concrete properties. *Case Studies in Construction Materials*, 17, e01486. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01486>
- He, J., Kawasaki, S., & Achal, V. (2020). The Utilization of Agricultural Waste as Agro-Cement in Concrete: A Review. *Sustainability*, 12(17), 6971. <https://doi.org/10.3390/su12176971>
- Hossain, K. M. A. (2004). Properties of volcanic pumice based cement and lightweight concrete. *Cement and Concrete Research*, 34(2), 283–291. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2003.08.004>
- Ikumi, T., & Segura, I. (2019). Numerical assessment of external sulfate attack in concrete structures. A review. *Cement and Concrete Research*, 121, 91–105. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.04.010>
- Ismail, Z. Z., & Jaeel, A. J. (2014). A novel use of undesirable wild giant reed biomass to replace aggregate in concrete. *Construction & Building Materials*, 67, 68–73. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.11.064>
- Jagadesh, P., Ramachandramurthy, A., & Murugesan, R. (2018). Evaluation of mechanical properties of Sugar Cane Bagasse Ash concrete. *Construction & Building Materials*, 176, 608–617. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.037>
- Jamil, M., Khan, M., Karim, Kaish, A., & Zain, M. (2016). Physical and chemical contributions of Rice Husk Ash on the properties of mortar. *Construction & Building Materials*, 128, 185–198. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.10.029>
- Jha, P., Sachan, A., & Singh, R. (2021). Investigation on the durability of concrete with partial replacement of cement by bagasse ash (BAH) and sand by stone dust (SDT). *Materials Today: Proceedings*, 43, 237–243. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.11.652>

- Jha, P., Sachan, A., & Singh, R. (2021). Agro-waste sugarcane bagasse ash (ScBA) as partial replacement of binder material in concrete. *Materials Today: Proceedings*, 44, 419–427. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.09.751>
- Jiang, C., Zhou, X., Tao, G., & Chen, D. (2016). Experimental Study on the Performance and Microstructure of Cementitious Materials Made with Dune Sand. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2016, 1–8. <https://doi.org/10.1155/2016/2158706>
- Juenger, M. C., & Siddique, R. (2015). Recent advances in understanding the role of supplementary cementitious materials in concrete. *Cement and Concrete Research*, 78, 71–80. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.03.018>
- Kalina, R. D., Al-Shmaisani, S., Ferron, R. D., & Juenger, M. C. G. (2019). False Positives in ASTM C618 Specifications for Natural Pozzolans. *ACI Materials Journal*, 116(1). <https://doi.org/10.14359/51712243>
- Kannan, V. (2018). Strength and durability performance of self-compacting concrete containing self-combusted rice husk ash and metakaolin. *Construction & Building Materials*, 160, 169–179. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.043>
- Kannan, V., & Ganesan, K. (2014). Chloride and chemical resistance of self-compacting concrete containing rice husk ash and metakaolin. *Construction And Building Materials*, 51, 225–234. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.10.050>
- Khatib, J. (2008). Performance of self-compacting concrete containing fly ash. *Construction & Building Materials*, 22(9), 1963–1971. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.07.011>
- Khodr, M. (2020). *The use of brown coal fly ash as a replacement of cement in concrete masonry*. Doctoral dissertation, RMIT University, 2020. <https://researchrepository.rmit.edu.au/esploro/>
- Khushnood, R. A., Rizwan, S. A., Memon, S. A., Tulliani, J. M., & Ferro, G. A. (2014). Experimental Investigation on Use of Wheat Straw Ash and Bentonite in Self-Compacting Cementitious System. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2014, 1–11. <https://doi.org/10.1155/2014/832508>
- Kim, M. J., Kim, K. B., & Ann, K. Y. (2016). The Influence of C₃A Content in Cement on the Chloride Transport. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2016, 1–8. <https://doi.org/10.1155/2016/5962821>
- Kockal, N. U., & Ozturan, T. (2011). Strength and elastic properties of structural lightweight concretes. *Materials in Engineering*, 32(4), 2396–2403. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2010.12.053>
- Koenig, A., & Dehn, F. (2015). Main considerations for the determination and evaluation of the acid resistance of cementitious materials. *Materials and Structures*, 49(5), 1693–1703. <https://doi.org/10.1617/s11527-015-0605-7>
- Kolawole, J. T., Babafemi, A. J., Fanijo, E., Paul, S. C., & Combrinck, R. (2021). State-of-the-art review on the use of sugarcane bagasse ash in cementitious materials. *Cement & Concrete Composites*, 118, 103975. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.103975>
- Kueaket, K., & Tonnayopas, D. (2021). Compressive strength and durability performance of mortar containing palm oil boiler clinker aggregate, rice husk ash, and calcium bentonite. *Istraživanja I Projektovanja Za Privredu*, 19(1), 193–203. <https://doi.org/10.5937/jaes0-27580>

- Kunchariyakun, K., Asavapisit, S., & Sombatsompop, K. (2015). Properties of autoclaved aerated concrete incorporating rice husk ash as partial replacement for fine aggregate. *Cement & Concrete Composites*, 55, 11–16. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.07.021>
- Liew, K., Sojobi, A., & Zhang, L. (2017). Green concrete: Prospects and challenges. *Construction & Building Materials*, 156, 1063–1095. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.008>
- Liuzzi, S., Sanarica, S., & Stefanizzi, P. (2017). Use of agro-wastes in building materials in the Mediterranean area: a review. *Energy Procedia*, 126, 242–249. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.08.147>
- Lozano, F. J., & Lozano, R. (2018). Assessing the potential sustainability benefits of agricultural residues: Biomass conversion to syngas for energy generation or to chemicals production. *Journal of Cleaner Production*, 172, 4162–4169. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.01.037>
- Magar, J. (2020). Application of Industrial and Agricultural Waste for Sustainable Construction. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*, 8(7), 1869–1875. <https://doi.org/10.22214/ijraset.2020.30699>
- Marcos-Meson, V., Fischer, G., Edvardsen, C., Skovhus, T., & Michel, A. (2019). Durability of Steel Fibre Reinforced Concrete (SFRC) exposed to acid attack – A literature review. *Construction & Building Materials*, 200, 490–501. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.051>
- Melotti, R., Santagata, E., Bassani, M., Salvo, M., & Rizzo, S. (2013). A preliminary investigation into the physical and chemical properties of biomass ashes used as aggregate fillers for bituminous mixtures. *Waste Management*, 33(9), 1906–1917. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.05.015>
- Memon, S. A., Javed, U., Shah, M. I., & Hanif, A. (2022). Use of Processed Sugarcane Bagasse Ash in Concrete as Partial Replacement of Cement: Mechanical and Durability Properties. *Buildings*, 12(10), 1769. <https://doi.org/10.3390/buildings12101769>
- Memon, S. A., Shaikh, M. A., & Akbar, H. (2011). Utilization of Rice Husk Ash as viscosity modifying agent in Self Compacting Concrete. *Construction & Building Materials*, 25(2), 1044–1048. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.06.074>
- Mo, K. H., Alengaram, U. J., Jumaat, M. Z., Yap, S. P., & Lee, S. C. (2016). Green concrete partially comprised of farming waste residues: a review. *Journal of Cleaner Production*, 117, 122–138. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.01.022>
- Mohammadhosseini, H., Alyousef, R., Ngian, S. P., & Tahir, M. M. (2021). Performance Evaluation of Sustainable Concrete Comprising Waste Polypropylene Food Tray Fibers and Palm Oil Fuel Ash Exposed to Sulfate and Acid Attacks. *Crystals*, 11(8), 966. <https://doi.org/10.3390/cryst11080966>
- Moraes, J., Tashima, M., Akasaki, J., Melges, J., Monzó, J., Borrachero, M., Soriano, L., & Payá, J. (2017). Effect of sugar cane straw ash (SCSA) as solid precursor and the alkaline activator composition on alkali-activated binders based on blast furnace slag (BFS). *Construction & Building Materials*, 144, 214–224. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.166>

- Mutunga, F., Muhammed, N., Ngui, F., KiNoti, I., & Marangu, J. (2022). A Review on Selected Durability Parameters on Performance of Geopolymers Containing Industrial By-products, Agro-Wastes and Natural Pozzolan. *Journal of Sustainable Construction Materials and Technologies*, 7(4), 375–400. <https://doi.org/10.47481/jscmt.1190244>
- Neto, J. D. S. A., De França, M. J. S., De Amorim Júnior, N. S., & Ribeiro, D. V. (2021). Effects of adding sugarcane bagasse ash on the properties and durability of concrete. *Construction & Building Materials*, 266, 120959. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120959>
- Neville, A. M. (2011). *Properties of concrete*. Fifth Edition., Pearson, Edinburgh, England, 2011.
- Nochaiya, T., Suriwong, T., & Julphunthong, P. (2022). Acidic corrosion-abrasion resistance of concrete containing fly ash and silica fume for use as concrete floors in pig farm. *Case Studies in Construction Materials*, 16, e01010. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01010>
- Nwankwo, C. O., Bamigboye, G. O., Davies, I. E., & Michaels, T. A. (2020). High volume Portland cement replacement: A review. *Construction & Building Materials*, 260, 120445. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120445>
- O’Connell, M., McNally, C., & Richardson, M. (2010). Biochemical attack on concrete in wastewater applications: A state of the art review. *Cement & Concrete Composites*, 32(7), 479–485. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2010.05.001>
- Ogork, E. N. N., Uche, O. A., & Elinwa, A. U. (2014). A Study on Groundnut Husk Ash (GHA)–Concrete under Acid Attack. *International OPEN ACCESS Journal of Modern Engineering Research (IJMER)*, 4(7), 30. https://www.academia.edu/download/35585832/Effect_Of_Particle_Size_Of_Groundnut_Husk_Ash.pdf
- Onyenokporo, N. C. (2022). Supplementary cementitious materials as sustainable partial replacement for cement in the building industry. *Int. J. Architect. Environ. Eng*, 16(3) 74–84. Retrieved June 26, 2024, from <https://publications.waset.org/10012226/pdf>
- Pandey, A., & Kumar, B. (2022). Utilization of agricultural and industrial waste as replacement of cement in pavement quality concrete: a review. *Environmental Science and Pollution Research International*, 29(17), 24504–24546. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-18189-5>
- Pandey, A., & Kumar, B. (2019). Investigation on the effects of acidic environment and accelerated carbonation on concrete admixed with rice straw ash and microsilica. *Journal Of Building Engineering*, 29, 101125. <https://doi.org/10.1016/j.job.2019.101125>
- Pandey, A., & Kumar, B. (2019). Effects of rice straw ash and micro silica on mechanical properties of pavement quality concrete. *Journal of Building Engineering*, 26, 100889. <https://doi.org/10.1016/j.job.2019.100889>
- Panesar, D., & Shindman, B. (2012). The mechanical, transport and thermal properties of mortar and concrete containing waste cork. *Cement & Concrete Composites*, 34(9), 982–992. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.06.003>
- Payá, J., Roselló, J., Monzó, J. M., Escalera, A., Santamarina, M. P., Borrachero, M. V., & Soriano, L. (2018). An Approach to a New Supplementary Cementing Material: Arundo donax Straw Ash. *Sustainability*, 10(11), 4273. <https://doi.org/10.3390/su10114273>

- Payá, J., Monzó, J., Borrachero, M. V., Díaz-Pinzón, L., & Ordóñez, L. M. (2002). Sugar-cane bagasse ash (SCBA): studies on its properties for reusing in concrete production. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology/Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 77(3), 321–325. <https://doi.org/10.1002/jctb.549>
- Prithika, A. J., & Sekar, S. (2016). Mechanical and fracture characteristics of Eco-friendly concrete produced using coconut shell, ground granulated blast furnace slag and manufactured sand. *Construction & Building Materials*, 103, 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.11.035>
- Prusty, J. K., Patro, S. K., & Basarkar, S. (2016). Concrete using agro-waste as fine aggregate for sustainable built environment – A review. *International Journal of Sustainable Built Environment*, 5(2), 312–333. <https://doi.org/10.1016/j.ijbsbe.2016.06.003>
- Qudoos, A., Kim, H. G., Atta-Ur-Rehman, N., & Ryou, J. S. (2018). Effect of mechanical processing on the pozzolanic efficiency and the microstructure development of wheat straw ash blended cement composites. *Construction & Building Materials*, 193, 481–490. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.10.229>
- Raghav, M., Park, T., Yang, H. M., Lee, S. Y., Karthick, S., & Lee, H. S. (2021). Review of the Effects of Supplementary Cementitious Materials and Chemical Additives on the Physical, Mechanical and Durability Properties of Hydraulic Concrete. *Materials*, 14(23), 7270. <https://doi.org/10.3390/ma14237270>
- Raheem, A. A., & Ikotun, B. D. (2020). Incorporation of agricultural residues as partial substitution for cement in concrete and mortar – A review. *Journal of Building Engineering*, 31, 101428. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101428>
- Règles Parasismiques Algériennes, *RPA99/Version 2003 (DTR, B. 48)*. (Centre National Recherche Appliquée En Génie Parasismique (CGS), Algérie, 2003 (In french)).
- Ren, J., Zhang, L., Walkley, B., Black, J. R., & Nicolas, R. S. (2022). Degradation resistance of different cementitious materials to phosphoric acid attack at early stage. *Cement and Concrete Research*, 151, 106606. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2021.106606>
- Rithuparna, R., Jittin, V., & Bahurudeen, A. (2021). Influence of different processing methods on the recycling potential of agro-waste ashes for sustainable cement production: A review. *Journal of Cleaner Production*, 316, 128242. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128242>
- Russo, N., Gastaldi, M., Schiavi, L., Strini, A., Zanoni, R., & Lollini, F. (2020). Effect of Cement Type and Micro-cracks on Chloride Penetration in Concrete. *XV International Conference on Durability of Building Materials and Components. eBook of Proceedings*. <https://doi.org/10.23967/dbmc.2020.051>
- Sablocrete, Synthèse du Projet National de Recherche et Développement, *Bétons de sable, caractéristiques et pratiques d'utilisation*. (Presses de l'école Nationale des Ponts et Chaussées LCPC, Paris, 1994 (In french)).
- Samimi, K., Kamaragi, G. R. D., & Roy, R. L. (2019). Microstructure, thermal analysis and chloride penetration of self-compacting concrete under different conditions. *Magazine of Concrete Research*, 71(3), 126–143. <https://doi.org/10.1680/jmacr.17.00367>
- Samreen, B., Farheen, B., & Syed, A. A. (2022). Study on supplementary cementitious materials for sustainable development of concrete. *I-manager's Journal on Material Science*, 10(1), 31. <https://doi.org/10.26634/jms.10.1.18906>

- Senhadji, Y., Escadeillas, G., Mouli, M., Khelafi, H., & Benosman, N. (2014). Influence of natural pozzolan, silica fume and limestone fine on strength, acid resistance and microstructure of mortar. *Powder Technology*, 254, 314–323. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2014.01.046>
- Senhadji, Y., Escadeillas, G., Khelafi, H., Mouli, M., & Benosman, A. S. (2012). Evaluation of natural pozzolan for use as supplementary cementitious material. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 16(1), 77–96. <https://doi.org/10.1080/19648189.2012.667692>
- Seyed, M., Bederina, M., & Makhloufi, Z. (2015). Effect of ternary binder on the mechanical and microstructural properties of sand concrete. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 30(4), 339–361. <https://doi.org/10.1080/01694243.2015.1099867>
- Shatat, M.R. (2016). Hydration behavior and mechanical properties of blended cement containing various amounts of rice husk ash in presence of metakaolin. *Arabian Journal of Chemistry*, 9, S1869–S1874. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2013.12.006>
- Singh, N., Singh, V., & Rai, S. (2000). Hydration of bagasse ash-blended portland cement. *Cement and Concrete Research*, 30(9), 1485–1488. [https://doi.org/10.1016/s0008-8846\(00\)00324-0](https://doi.org/10.1016/s0008-8846(00)00324-0)
- Sulaiman, T., Abdurrahman, A., & Ja'E, I. A. (2019). Workability retention potentials of class C and F pozzolans and their influence on cement properties. *Bayero J. Eng. Technol. (BJET)*, 14(2) (2019) 183-193.
- Sun, W., Jiang, Y., & Liu, J. Z. (2014). Analysing the Micro Structure of Sea Sand Concrete. *Applied Mechanics and Materials*, 584–586, 1076–1080. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.584-586.1076>
- Onyenokporo, N. C. (2022). Supplementary Cementitious Materials as Sustainable Partial Replacement for Cement in the Building Industry. *Int. J. Architect. Environ. Eng.*, 16(3) 74-84. Retrieved June 26, 2024, from <https://publications.waset.org/10012226/pdf>
- Suraneni, P., Burris, L., Shearer, C. R., & Hooton, R. D. (2021). ASTM C618 Fly Ash Specification: Comparison with Other Specifications, Shortcomings, and Solutions. *ACI Materials Journal*, 118(1). <https://doi.org/10.14359/51725994>
- Tahami, S. A., Arabani, M., & Mirhosseini, A. F. (2018). Usage of two biomass ashes as filler in hot mix asphalt. *Construction & Building Materials*, 170, 547–556. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.102>
- Tangchirapat, W., Saeting, T., Jaturapitakkul, C., Kiattikomol, K., & Siripanichgorn, A. (2007). Use of waste ash from palm oil industry in concrete. *Waste Management*, 27(1), 81–88. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2005.12.014>
- Tantawy, M. A., El-Roudi, A. M., & Salem, A. A. (2014). Utilization of bagasse ash as supplementary cementitious material. *Int. J. Eng. Res. Technol.*
- Thomas, B. S., Yang, J., Mo, K. H., Abdalla, J. A., Hawileh, R. A., & Ariyachandra, E. (2021). Biomass ashes from agricultural wastes as supplementary cementitious materials or aggregate replacement in cement/geopolymer concrete: A comprehensive review. *Journal of Building Engineering*, 40, 102332. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102332>
- Thomas, B., Yang, J., Bahurudeen, A., Abdalla, J., Hawileh, R., Hamada, H., Nazar, S., Jittin, V., & Ashish, D. (2021). Sugarcane bagasse ash as supplementary cementitious material in

- concrete – a review. *Materials Today Sustainability*, 15, 100086. <https://doi.org/10.1016/j.mtsust.2021.100086>
- Tipraj, B., & Shanmugapriya, T. (2023). Experimental investigation on ternary blended geopolymer mortar synthesized from Industrial-agro and municipal solid waste ash subjected to different acid exposure. *Materials Research Express*, 10(12), 125503. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ad112a>
- Torres, G. B., Dognani, G., Da Silva Agostini, D. L., Santos, R. J. D., Cabrera, F. C., Aguilar, C. M. G., De Paiva, F. F. G., Teixeira, S. R., & Job, A. E. (2021). Potential Eco-friendly Application of Sugarcane Bagasse Ash in the Rubber Industry. *Waste and Biomass Valorization*, 12(8), 4599–4613. <https://doi.org/10.1007/s12649-020-01309-6>
- Türkel, S. E. L. Ç. U. K., Felekoğlu, B., & Dulluc, S. (2007). Influence of various acids on the physico-mechanical properties of pozzolanic cement mortars. *Sadhana*, 32, 683-691.
- Ullah, Z., Qureshi, M. I., Ahmad, A., Khan, S. U., & Javaid, M. F. (2021). An experimental study on the mechanical and durability properties assessment of E-waste concrete. *Journal of Building Engineering*, 38, 102177. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102177>
- Van Tuan, N., Ye, G., Van Breugel, K., & Copuroglu, O. (2011). Hydration and microstructure of ultra-high performance concrete incorporating rice husk ash. *Cement and Concrete Research*, 41(11), 1104–1111. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.06.009>
- Van, V. T. A., Röbller, C., Bui, D. D., & Ludwig, H. M. (2014). Rice husk ash as both pozzolanic admixture and internal curing agent in ultra-high performance concrete. *Cement & Concrete Composites*, 53, 270–278. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.07.015>
- Viruthagiri, G., Priya, S. S., Shanmugam, N., Balaji, A., Balamurugan, K., & Gopinathan, E. (2015). Spectroscopic investigation on the production of clay bricks with SCBA waste. *Spectrochimica Acta. Part a, Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 149, 468–475. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2015.05.006>
- Wang, W., Wei, W., Gao, S., Chen, G., Yuan, J., & Li, Y. (2021). Agricultural and Aquaculture Wastes as Concrete Components: A Review. *Frontiers in Materials*, 8. <https://doi.org/10.3389/fmats.2021.762568>
- Wang, Z., Wang, B., Yang, D., & Han, J. (2020). Research progress on the chloride binding capability of cement-based composites. *Journal of the Ceramic Society of Japan*, 128(5), 238–253. <https://doi.org/10.2109/jcersj2.19146>
- Werther, J., Saenger, M., Hartge, E. U., Ogada, T., & Siagi, Z. (2000). Combustion of agricultural residues. *Progress in Energy and Combustion Science*, 26(1), 1–27. [https://doi.org/10.1016/s0360-1285\(99\)00005-2](https://doi.org/10.1016/s0360-1285(99)00005-2)
- Witkowska-Dobrev, J., Szlachetka, O., Dohojda, M., & Wiśniewski, K. (2021). Effect of Acetic Acid on Compressive Strength and Geometric Texture of the Surface of C20/25 Class Concrete. *Sustainability*, 13(9), 5136. <https://doi.org/10.3390/su13095136>
- Wonorahardjo, S., Sutjahja, I. M., Mardiyati, Y., Andoni, H., Thomas, D., Achsani, R. A., & Steven, S. (2019). Characterising thermal behaviour of buildings and its effect on urban heat island in tropical areas. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, 11(1), 129–142. <https://doi.org/10.1007/s40095-019-00317-0>
- Wuni, I. Y., Shen, G. Q., & Osei-Kyei, R. (2019). Scientometric review of global research trends on green buildings in construction journals from 1992 to 2018. *Energy and Buildings*, 190, 69–85. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.02.010>

- Xu, Q., Ji, T., Gao, S. J., Yang, Z., & Wu, N. (2018). Characteristics and Applications of Sugar Cane Bagasse Ash Waste in Cementitious Materials. *Materials*, *12*(1), 39. <https://doi.org/10.3390/ma12010039>
- Zareei, S. A., Ameri, F., & Bahrami, N. (2018). Microstructure, strength, and durability of eco-friendly concretes containing sugarcane bagasse ash. *Construction & Building Materials*, *184*, 258–268. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.153>
- Zareei, S. A., Ameri, F., Dorostkar, F., & Ahmadi, M. (2017). Rice husk ash as a partial replacement of cement in high strength concrete containing micro silica: Evaluating durability and mechanical properties. *Case Studies in Construction Materials*, *7*, 73–81. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2017.05.001>
- Zerihun, B., Yehualaw, M. D., & Vo, D. H. (2022). Effect of Agricultural Crop Wastes as Partial Replacement of Cement in Concrete Production. *Advances in Civil Engineering*, *2022*, 1–31. <https://doi.org/10.1155/2022/5648187>
- Zhang, Y., Gu, L., & Zhang, Q. (2022). Durability of manufactured sand concrete in atmospheric acidification environment. *Case Studies in Construction Materials*, *17*, e01613. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01613>