

Université 20 Août 1955-Skikda
Faculté de Technologie
Département de Génie Civil
Ref : D 012123016D



جامعة 20 أوت 1955 سكيكدة
كلية التكنولوجيا
قسم الهندسة المدنية
المرجع : D 012123016D

Thèse présentée en vue de l'obtention
du diplôme de

Doctorat de 3ème cycle (LMD)

Spécialité

Génie Civil

Option

Matériaux en Génie Civil

Présentée par

GUERFI ROQIYA

Thème

CONTRIBUTION A L'ETUDE D'UN BETON
AUTO-PLAÇANT A BASE DE CENDRES.
CARACTERISATIONS – FORMULATIONS -
PERFORMANCES - DURABILITE

Soutenue publiquement le :12/07/ 2023

Directrice de thèse	Hebhoub Houria	Pr	Université de Skikda
Co-directeur de thèse	Boudchicha Mohamed Redda	MCA	ENP Constantine

Devant le jury composé de:

Présidente	Kharraf Leila	l'université de Skikda
Examineur	Kechkar Chiraz	l'université de Guelma
Examinatrice	Nigri Ghania	l'université de Guelma

REMERCIEMENTS

Ce travail a été effectué au sein du Laboratoire des Matériaux, Geotechnique, Habitat et Urbanisme ainsi qu'au Laboratoire National Habitat et Construction

Je souhaite en premier lieu exprimer ma gratitude envers le Tout-Puissant, **Allah**, pour m'avoir accordé le courage, la force, la volonté et surtout la patience nécessaires pour accomplir cette humble contribution scientifique.

Je remercie tout d'abord Madame **Hebhoub Houria**, Professeur à l'université du 20 Aout 1955 de Skikda, et Monsieur **Boudchicha Mohamed Redda**, Maître de Conférences à l'école nationale polytechnique de Constantine, qui ont bien voulu m'encadrer lors de ces trois dernières années, pour leurs conseils avisés et leurs grandes disponibilités.

J'exprime ma sincères reconnaissance à Madame **Kharraf Leila**, Maître de Conférences à l'université du 20 Aout 1955 de Skikda pour son aide, ses remarques, ses conseils précieux et pour avoir accepté de présider le jury de soutenance.

Mes remerciements vont également à Madame **Kechkar Chiraz** Maître de Conférences à l'université de Guelma, qui a accepté de prendre de son temps pour juger ce travail, qu'elle soit assuré de ma profonde reconnaissance.

Mes remerciements vont également à Madame **Nigri Ghania** Maître de Conférences à l'université de Guelma d'avoir accepté de juger ce travail. Qu'elle trouve ici l'expression de ma sincère gratitude

Je tiens également à exprimer mes plus vifs remerciements à Amar Zaabat et Boussali Linda, ingénieurs au laboratoire pédagogique de Skikda, Louadje Adel et Djuima Mohamed ainsi que Zitouni Razika de LNHC de Skikda, pour leurs aides, leurs conseils, et pour tous les services qu'ils m'ont offerts.

À toutes les enseignantes, tous les enseignants et les ingénieurs du département Génie Civil, notamment le corps professoral, pour les précieux conseils.

Enfin, j'adresse toute mon affection à mes frères, ma sœur pour leurs soutiens et leurs présences ; sans eux, je ne serais pas aller si loin. Je terminerai en remerciant toute la famille et mes amis.

A ma famille

RESUME

L'objectif de ce travail est de substitué partiellement des fines calcaires d'un BAP par des cendres de bois généré par l'incinération des forêts et la combustion des déchets végétaux et la préparation des charbons du fait que l'obtention des fines calcaires nécessite la consommation de l'énergie et affecte négativement l'environnement. Dans ce travail nous avons confectionné un BAP de référence (0%) ensuite substitué volumiquement les fines calcaires par des cendres de bois avec des taux 6,12, 18 et 24% et étudies les propriétés a l'état frais (Densité, Etalement, Aptitude à l'écoulement, stabilité au tamis, Temps d'écoulement a l'entonnoir and air occlus) ainsi que les propriétés a l'état durci à savoir la résistance en compression et en traction par flexion, la résistance obtenue par scléromètre, les vitesses ultrasonique, module d'élasticité, absorption d'eau par immersion et capillarité, pénétration des chlorures et la résistance au attaque chimique et l'analyse par DRX et FTIR avant et après attaque et le MEB. Les résultats obtenues montrent que la substitution partielle des fines calcaires par des cendres de bois rend le béton plus compacte, diminue l'étalement, améliorent l'écoulement du BAP en milieu confiné et donne une stabilité satisfaisante. Aussi, cette substitution donne au béton des résistances en compression et en traction par flexion acceptable, une bonne homogénéité, bonne dureté a la surface avec une diminution de l'absorption d'eau par immersion et améliore la résistance au attaque chimique.

Mot clés : Substitution, fines calcaires, cendres de bois, performances mécaniques, BAP ,attaque chimique.

ABSTRACT

The objective of the present research aims to partially substitute fine limestone from a SCC with wood ash generated by the incineration of forests and the combustion of vegetable waste and the preparation of coals because obtaining fine limestone requires energy consumption and negatively affects the environment. In this work we made a reference SCC (0%) then substituted the fine limestone by volume with wood ash with rates of 6.12, 18 and 24% and studied the properties in the fresh state (Density, Flow test , L-BOX, sieve stability, V-funnel and air content) as well as the properties in the hardened state, namely the resistance in compression and in tension by bending, the resistance obtained by sclerometer, the ultrasonic speeds, modulus of elasticity, water absorption by immersion and capillarity, chloride penetration and analysis by DRX and FTIR and MEB. The results obtained show that the partial substitution of fine limestone by wood ash makes the concrete more compact, reduces spreading, improves the flow of SCC in a confined environment and gives satisfactory stability. Also, this substitution give the concrete acceptable compressive and tensile strengths, good homogeneity and with a decrease in water absorption by immersion and improves resistance to chemical attack.

attack.

Key words: Substitution, fine limestones, wood ash, mechanical performance, SCC ,chemical attack.

ملخص

يهدف هذا العمل إلى استبدال الحجر الجيري الناعم في خليط الخرسانة ذاتية الصب جزئياً برماد الخشب الناتج عن احتراق الغابات واحتراق النفايات النباتية وتحضير الفحم. إن الحصول على الحجر الجيري الناعم يتطلب استهلاك الطاقة ويؤثر سلباً على البيئة و في هذا العمل ، قمنا بإعداد خرسانة كمرجع (0%)، ثم استبدلنا الأحجار الجيرية الناعمة برماد الخشب حجمياً بنسب 6 ، 12 ، 18 و 24%. درسنا خصائص الخليط في الحالة الطازجة (الكثافة واختبار التدفق وقابلية التدفق وقت تدفق القمع) وكذلك في الحالة المتصلبة (مقاومة الضغط والشد ومقاومة السطح والموجات فوق الصوتية ومعامل المرونة وامتصاص الماء بالغمر وبالشمعية واختراق الكلوريدات ومقاومة الهجوم في الاوساط الكيميائية والتحليل بواسطة الاشعة السينية والتحويل الضوئي الحراري و المجهر الماسح الالكتروني تظهر النتائج التي تم الحصول عليها أن الاستبدال الجزئي للحجر الجيري الناعم برماد الخشب يجعل الخرسانة أكثر إحكاماً ، ويقلل من الانتشار ، ويحسن التدفق في بيئة ضيقة ويعطي ثباتاً مرضياً. أيضاً ، يعطي هذا الاستبدال للخرسانة قوة ضغط وشد مقبولة ، وتجانساً جيداً ، وصلابة سطحية جيدة مع انخفاض في ..امتصاص الماء عن طريق الغمر ويحسن المقاومة للهجوم الكيميائي

.الكلمات المفتاحية: الاستبدال، الحجر الجيري الناعم ، رماد الخشب ، الأداء الميكانيكي ، للخرسانة ذاتية الضغط ، الهجوم الكيميائي

Sommaire

Liste des figures	i
Liste des tableaux	iv
Introduction générale	2

Chapitre I: Recherche bibliographique

I.1. Introduction	5
I.2. Les bétons auto-plaçant	5
I.2.1. Importance des fines calcaires dans la composition des bétons auto-plaçant	5
I.2.1.1. Définition	5
I.2.1.2. Le rôle des fines calcaires dans la formulation des BAP	6
I.2.1.3. Production des fines calcaires	6
I.2.1.4. Impacte des fines calcaires sur l'environnement	7
I.3. Valorisation des cendres de biomasse dans le domaine de génie civil	11
I.3.1. Différents type de cendres d'origine végétale utilisée comme matériaux de génie civil	11
I.3.1.1. Cendres de paille	11
I.3.1.2. Cendre de balle de riz	12
I.3.1.3. Cendres de coques de noix de palme	12
I.3.1.4. Cendres de bagasse de cannes à sucre	13
I.3.1.5. Cendre de grignons d'olives	13
I.3.1.6. Cendres de biomasse (bois)	14
I.4. Travaux antérieures	16
I.5. Conclusion	19

Chapitre II: Caractérisation des matériaux

II.1. Introduction	21
II.2. Caractérisation des matériaux	21
II.2.1. Essai sur granulats (sable et graviers)	21
II.2.1.1. Analyse granulométrique [NF EN 933-1]	21
II.2.1.2. Masse volumique apparente [NF P18-555]	23
II.2.1.3. Masse volumique absolue [NF EN 1097-6]	24
II.2.1.4. Equivalent de sable [NF EN 933-8]	24
II.2.1.5. Bleu de Méthylène [NF EN 933-9]	25
II.2.1.6. Absorption d'eau [NF EN 18-555]	26
II.2.1.7. Dureté (résistance au choc [NF EN 1097-2] et a l'usure [NF EN 1097-1])	26
II.2.1.8. Coefficient d'aplatissement [NF P18-561]	26
II.2.1.9. Analyse chimique [NFP 18 - 011]	27
II.2.2. Ciment	27
II.2.3. Fines calcaires	29
II.2.4. Cendres de bois	30
II.2.5. Adjuvant	32
II.2.6. Eau de gâchage	32
II.3. Conclusion	33

Chapitre III: Programme expérimental et méthodologie d'essai

III.1. Introduction	35
III.2. Programme expérimental	35
III.2.1. Etude de la composition des mélanges selon la méthode de Shen	35
III.2.2. Composition des mélanges	38
III.2.3. Formulation des mélanges	39
III.2.4. Fabrication des mélanges	39
III.3. Méthodes d'essais	42
III.3.1. Essai sur béton frais	42
III.3.1.1. Essai d'étalement (Slump Flow)[NF EN 12350-8]	42
III.3.1.2. Air occlus [NF EN 12350-7]	42
III.3.1.3. Densité [NF EN 12350-6]	43
III.3.1.4. Essai de la boîte en L [NF EN 12350-10]	43
III.3.1.5. Essai de stabilité au tamis [NF EN 12350-11]	44
III.3.1.6. Essai V funnel [NF EN 12350-9]	45
III.3.2. Essai sur béton durci	45
III.3.2.1. Essai de compression	45
III.3.2.2. Essai de traction par flexion [EN 12390-5]	46
III.3.2.3. Essai au scléromètre [NF EN 12504-2]	46
III.3.2.4. Essai d'ultrason [NF EN 12504-4]	47
III.3.2.5. Essai d'absorption par immersion [norme NF P 18-555]	48
III.3.2.6. Essai d'absorption capillaire [NF EN 480-5]	48
III.3.2.7. Essai pénétration de chlorures (NF EN 12390-11)	49
III.3.2.8. Essai des attaques chimiques [ASTM C267-17]	50
III.3.2.9. Diffraction des rayons X(DRX)	52
III.3.2.10. Spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR)	52
III.3.2.11. Microscope électronique à balayage (MEB)	53
III.4. Conclusion	53

Chapitre IV: Influence des cendres de bois sur les propriétés du béton auto-plaçant

IV.1. Introduction	55
IV.2. Influence du taux de substitution des cendres de bois sur les propriétés à l'état frais	55
IV.2.1. Etalement	55
IV.2. 2. Aptitude à l'écoulement (L –Box)	55
IV.2.3. Résistance à la ségrégation statique (stabilité au tamis)	56
IV.2.4. Temps d'écoulement a l'entonnoir « V-funnel » Viscosité apparente	56
IV.2.5. Densité	57
IV.2.6. Air occlus	58
IV.3. Influence du taux de substitution des cendres de bois sur les propriétés à l'état durci	58
IV.3.1. Résistance à la compression	58
IV.3.2. Résistance en traction par flexion	59
IV.3.3. Résistance en compression obtenue par l'essai scléromètre	60
IV.3.4. Vitesse de propagation du son obtenue par ultrason	61
IV.3.5. Résistance à la compression obtenue par la méthode combinée ultrason/scléromètre	61

IV.3.6. Module d'élasticité dynamique	62
IV.3.7. Etude structurale par DRX	63
IV.4. Conclusion	64

Chapitre V: Influence des cendres de bois sur les paramètres de durabilité et microstructural du béton auto-plaçant

V.1. Introduction	66
IV.2. Influence du taux de substitution des cendres de bois sur les paramètres de durabilité	66
V.2.1. Absorption d'eau par immersion	66
V.2.2. Absorption capillaire	66
V.2.3. Pénétrations des chlorures	67
V.2.4. Résistances chimiques aux acides et bases	68
V.2.4.1. Attaque par acide chloridrique HCL	68
V.2.4.2. Attaque par acide sulfurique H ₂ SO ₄	68
V.2.4.3. Attaque par acide acétique CH ₃ COOH	69
V.2.4.4. Attaque par l'hydroxyde de potassium KOH	70
V.2.4.5. Attaque par NaCL	71
V.3. Etude de la microstructure des bétons exposés aux attaques chimiques	72
V.3.1. Analyse des spectres FTIR des BAP exposés aux attaques chimiques	72
V.3.2. Analyse des DRX des BAP exposés aux attaques chimiques	74
V.3.3. Microstructure de la surface des BAP exposés aux attaques chimiques	76
V.3.3.1. Microstructure de la surface des échantillons à 18 % cendre non attaquées	76
V.3.3.2. Microstructure des échantillons BAP (0 %) de cendres attaquées chimiquement pendant 120 jours	76
V.3.3.3. Microstructure de la surface des échantillons à 18 % de cendres attaquées chimiquement pendant 120 jours	78
V.4. Conclusion	79
Conclusions générales	81
Bibliographie	84

Liste des figures

Figure I.1 : Extraction de calcaire	07
Figure I.2 : L'exploitation des carrières	07
Figure I.3 : Destruction des habitats naturels	08
Figure I.4 : Dégradation des sols	08
Figure I.5 : La pollution de l'eau	09
Figure I.6 : Émissions de poussières	10
Figure I.7 : Perturbation des écosystèmes	10
Figure I.8 : Cendres de paille	11
Figure I.9 : Balle de riz	12
Figure I.10: Coques de noix de palme	12
Figure I.11: Bagasse de canne à sucre	13
Figure I.12: Cendre de grignons d'olives	13
Figure I.13: Cendre de biomasse	14
Figure I.14: Cendres de bois comme amendement pour le sol	15
Figure I.15: Fabrication de savon à base de cendre de bois	15
Figure I.16: Cendre de bois comme Répulsif contre les nuisibles	16
Figure I.17: Vitesse d'impulsion ultrasonique des mélanges des BAP (Gritsada et Natt (2013))	17
Figure I.18: Relation entre la diminution de la résistance à la compression et la concentration de CO agressif dans la solution active après 90, 180 et 360 jours 2 d'exposition (Elinwa et al. (2008)).	18
Figure I.19: Résistance à la flexion et à la compression des mélanges.	19
Figure II.1: Analyse granulométrique	22
Figure II.2: Courbe d'analyse granulométrique des granulats	23
Figure II.3: Mesure de la masse volumique apparente	23
Figure II.4: Equivalent de sable	25
Figure II.5 : Essai au Bleu de Méthylène	25
Figure II.6: CPA-CEM I de M'sila	27
Figure II.7: Mesure de la densité	28
Figure II.8: Mesure de la SSb	28
Figure II.9: Fines calcaires de la carrière de Ben Azzouz	29
Figure II.10: Cendres de bois	30
Figure II.11: Distribution granulométrique de la cendre de bois, fine calcaire, ciment	31
Figure II.12: DRX de ciment, fines calcaires et cendres de bois	32
Figure III.1: Diagramme de l'essai de compactage selon ASTM C29/C29m (Shen et al. (2008))	36
Figure III.2: Malaxeur utilisé.	40
Figure III.3: Les phases de malaxage	40
Figure III.4: Les moules utilisés.	41
Figure III.5: Conservation des éprouvettes.	41
Figure III.6: Essai d'étalement	42
Figure III.7: Aéromètre à béton	43
Figure III.8: Mesure de la densité	43
Figure III.9: Essai de la boîte en L	44
Figure III.10: Essai de stabilité au tamis	44
Figure III.11: Essai V funnel	45
Figure III.12: Essai de compression	45

Figure III.13: Essai de flexion	46
Figure III.14: Essai au scléromètre	47
Figure III.15: Essai d'ultrason	47
Figure III. 16: Essai d'absorption par immersion	48
Figure III. 17: Essai d'absorption capillaire	49
Figure III.18: Essai pénétration des chlorures	49
Figure III.19: Epruvettes immergées dans une solution de 4% d'HCL	50
Figure III.20: Epruvettes immergées dans une solution de 4% de H ₂ SO ₄	51
Figure III.21: Epruvettes immergées dans une solution de 4 % d' CH ₃ COOH	51
Figure III.22: Epruvettes immergées dans une solution de 4% de KOH	51
Figure III.23: Diffractomètre DRX (Philips, X'Pert)	52
Figure III.24: Spectrophotomètre infrarouge à transformée de Fourier	52
Figure III.25: Microscope électronique à balayage	53
Figure IV.1: Variation de l'étalement en fonction du taux de substitution	55
Figure IV.2: Influence du taux de substitution sur capacité de remplissage	56
Figure IV.3: Influence du taux de substitution sur l'indice de ségrégation	56
Figure IV.4: Influence du taux de substitution sur temps d'écoulement	57
Figure IV.5: Influence du taux de substitution sur la densité	57
Figure IV.6: Influence du taux de substitution sur la teneur de l'air occlus	58
Figure IV.7: Influence du taux de substitution sur la résistance en compression	59
Figure IV.8: MEB D'un BAP de 18% de cendre de bois	59
Figure IV.9: Influence du taux de substitution sur la résistance en traction par flexion	60
Figure IV.10: Influence du taux de substitution sur la résistance en compression obtenue par l'essai scléromètre	60
Figure IV.11: Variation de la vitesse ultrasonique en fonction du taux de substitution	61
Figure IV. 12: Influence du taux de substitution sur la résistance en compression obtenue par combinaison ultrason/scléromètre	62
Figure IV.13: Variation du module d'élasticité en fonction du taux de substitution	62
Figure IV.14: XRD results of hardened concrete specimens.	63
Figure IV.15: FTIR des BAP de 0 et 24%de cendre de bois	63
Figure V.1: Variation du coefficient d'absorption d'eau par immersion en fonction du taux de substitution	66
Figure V.2: Variation de l'absorption capillaire en fonction du temps	67
Figure V.3: Variation de la profondeur de la pénétration des chlorures en fonction des taux de substitution	67
Figure V.4: Variation de la perte en poids en fonction du temps d'immersion dans la solution de 4% de HCL	68
Figure V.5: Variation de la perte en poids en fonction du temps d'immersion dans la solution de 4% de H ₂ SO ₄	69
Figure V.6: Variation de la perte en poids en fonction de temps d'immersion dans la solution de 4% de CH ₃ COOH	70
Figure V.7: Variation de la perte en poids en fonction du temps d'immersion dans la solution de 4% de KOH	71
Figure V.8: Variation de la perte en poids en fonction du temps d'immersion dans la solution de 4% de NaCL	71
Figure V.9: Courbe d'absorption de la spectroscopie FTIR de BAP0% attaqué par les différentes solutions	73
Figure V.10: Courbe d'absorption de la spectroscopie FTIR de BAP 24% attaqué par les différentes solutions	73
Figure V.11: Courbe DRX de BAP0% attaqué par les différentes solutions	75

Figure V.12: Courbe DRX de BAP24% attaqué par les différentes solutions	75
Figure V.13: Image MEB de la surface BAP18% avant attaque chimique	76
Figure V.14: Image MEB de la surface BAP0% après attaque chimique	77
Figure V.15: Image MEB de la surface BAP18% après attaque chimique	78

Liste des tableaux

Tableau II.1: Résultats d'analyse granulométrique de sable et graviers	22
Tableau II.2: Masse volumique apparente de sable de graviers	24
Tableau II.3: Masse volumique absolue de sable de graviers	24
Tableau II.4: Equivalent de sable	24
Tableau II.5: Mesure de valeur au bleu de Méthylène	25
Tableau II.6: Coefficient d'absorption d'eau de sable et graviers	26
Tableau II.7: Résultats des essais de duretés	26
Tableau II.8: Coefficient d'aplatissement	26
Tableau II.9: Analyse chimique de sable et graviers	27
Tableau II.10: Composition chimique et minéralogique du CEM I	28
Tableau II.11: Propriétés physiques et mécaniques du CPA-CEM I	29
Tableau II.12: Propriétés des fines calcaires	29
Tableau II.13: Composition chimique des cendres de bois	30
Tableau II.14: Analyse chimique de l'eau de gâchage	33
Tableau III.1: Différentes compositions utilisées dans l'étude	38
Tableau III.2: Composition des mélanges	39

Introduction générale

Introduction générale

La mise en œuvre de structures de construction complexes repose fortement sur des bétons auto-plaçant. La capacité d'auto-compactage sans avoir besoin de vibrations externes ou internes rationalise le processus de construction. Les avantages de l'utilisation de tels bétons sont nombreux: durées de chantier raccourcies, bétonnage sans effort, remplissage précis des coffrages, sollicitation physique réduite des ouvriers, nuisances sonores minimales et augmentation globale de la sécurité pour toutes les parties impliquées sur le chantier.

La combustion des déchets de biomasse, les déchets végétaux et les feux de forêt, la préparation du charbon de bois et les cheminées de chauffage traditionnelles génèrent d'énormes quantités de cendres. Une partie de ces dernières sont valorisées par épandage sur les terres agricoles (Cuenca et al. 2013) en tant que fertilisants ou amendement calcique, bien qu'elles ne fournissent pas suffisamment de nutriments pour être appliquées à cette fin (Hasnain et al. 2021). L'autre partie est généralement déposée dans des décharges, qui deviennent rapidement nombreuses et constituent avec le temps un fardeau environnemental. Une attention toute particulière est alors portée à ce créneau porteur de la valeur ajoutée afin d'envisager la valorisation de ces cendres dans les matériaux de construction pour une économie circulaire; dans un contexte de développement durable.

Dans ce cadre, la réflexion vers la valorisation de ces cendres comme ajout dans la formulation d'un béton auto-plaçant peut être une solution économique du fait que ce matériau est constitué essentiellement de fines calcaires et de fillers, et que la production de ces derniers nécessite beaucoup d'énergie et influe négativement sur l'environnement.

L'utilisation de cendres issues des végétations (cendres de charbon, cendres de bois, cendres de palmier, cendres de bagasse à canne, cendres de balle de riz, cendres de grignon d'olive.....) a fait l'objet de nombreuses recherches en raison de l'activité pouzzolanique et/ou hydraulique de ces cendres (Villar-Cociña et al. 2008).

L'ensemble de ces recherches montrent l'importance de la valorisation des cendres issues des végétations comme des ajouts remplacent un ciment ou des granulats fins dans la formulation du béton auto-plaçant.

Cette recherche vise à évaluer l'utilisation des cendres de bois résultants de l'incinération des forêts et la combustion des déchets végétaux comme substituant partiel des fines calcaires avec des taux de 6%, 12%, 18% et 24% dans la formulation d'un béton auto-plaçant dans le but de:

- Réduire le coût de production de ces fines,
- Donner une autre utilisation à ces cendres,
- Produire des nouveaux bétons auto-plaçant,
- Préserver les ressources naturelles d'où la protection de l'environnement.

Pour exécuter ce travail, la thèse est divisée en cinq chapitres:

Dans le premier chapitre: état de connaissances, nous avons signalé l'importance du béton auto-plaçant comme matériaux de construction ensuite visé l'impact de production des fines calcaires et leur utilisation comme fines dans les BAP. Nous avons signalé également les différents types des cendres et en particulier les cendres de bois et les travaux antérieurs utilisant ce matériau dans le domaine de génie civil.

Le deuxième chapitre : caractérisation des matériaux, décrit l'ensemble des matériaux utilisés dans cette étude et les différents essais de caractérisation de ces matériaux et les résultats de pour chaque matériaux.

Dans le chapitre trois: programme expérimental et méthode d'essai on précise, le programme expérimental, la méthode de formulation de ce type de béton, les résultats de la formulation et les méthodes de fabrication des mélanges pour chaque essai, les méthodes de confection des éprouvettes, ainsi qu'une description détaillé sur l'ensemble des essais réalisés sur ce programme expérimental.

Le quatrième chapitre, influence des fines de cendre de bois sur les propriétés des bétons auto-plaçant a l'état frais (densité, ouvrabilité, L-BOX, stabilité au tamis, V-funnel et air content et les performances mécaniques; résistance en compression et en traction par flexion, dureté a la surface et homogénéité et le module d'élasticité à l'état durci). On analysant dans cette partie l'ensemble des résultats obtenus.

Dans le cinquième chapitre on étudié l'effet des cendres de bois sur les paramètres de durabilité à savoir, l'absorption capillaire et par immersion, les attaques chimiques par les acides et les bases ainsi que les pénétrations des ions de chlorures on renforçant l'interprétation des résultats par analyse par DRX, FTIR.et MEB.

Finalement on sort avec quelques conclusions et recommandations.

Chapitre I

Recherche bibliographique

I. Recherche bibliographique

I.1. Introduction

Le béton est un matériau de construction largement utilisé, dont la composition est spécifiquement adaptée à chaque ouvrage. En plus de ses propriétés mécaniques, il doit répondre à des exigences esthétiques, environnementales et de durabilité. Les entreprises de construction doivent donc tenir compte de ces aspects pour offrir des ouvrages durables, respectueux de l'esthétiquement attractifs.

Le béton auto-plaçant (BAP) est une innovation dans le domaine de la construction civile offrant des avantages techniques (facilité de mise en œuvre) et socio-économiques (réduction de la pénibilité au travail). Cette technologie a été développée au Japon pour remédier à un manque de main-d'œuvre qualifiée en matière de vibration de béton. Les BAP sont très fluides et se mettent en place sans serrage interne ou externe, même dans des coffrages à densité d'armatures élevée. En outre, la fluidité des BAP permet des finitions de parement de haute qualité.

L'utilisation des fines de calcaires dans la formulation des bétons est devenue une pratique courante dans l'industrie du (BAP). Cependant, l'utilisation excessive de ce matériau peut avoir un impact négatif sur l'environnement et peuvent être relativement coûteuses. Pour remédier à cette problématique, une alternative de substitution intéressante est l'utilisation des cendres de bois, un matériau abondant et peu coûteux issu de la combustion de la biomasse.

Cette étude vise donc à évaluer l'effet de la substitution partielle des fines calcaires par des cendres de bois dans la formulation d'un BAP, en s'appuyant sur une revue bibliographique des travaux antérieurs menés sur le sujet.

I.2. Les bétons auto-plaçant

Les bétons auto-plaçant (BAP) sont différents des bétons ordinaires par leur dosage en éléments fins plus élevé et un volume de gravillon plus faible. Les BAP ont un même dosage en ciment et en eau que les bétons ordinaires et un volume de sable assez proche.

L'ajout de fine de calcaire permet une meilleure lubrification du système, tandis que l'utilisation d'adjuvants, tels que les superplastifiant et les agents colloïdaux, assure une meilleure stabilité et évite les problèmes de ségrégation et de ressuage.

I.2.1. Importance des fines calcaires dans la composition des bétons auto-plaçant

I.2.1.1. Définition

Le calcaire composé principalement de carbonate de calcium, utilisée dans de nombreux domaines, notamment la construction et l'industrie. Il est principalement utilisé pour produire du ciment Portland, mais on le retrouve également dans divers produits de la vie quotidienne tels que les céréales, la peinture, les suppléments de calcium, les comprimés antiacides, le papier et les matériaux de toiture. Le calcaire est également responsable de la formation de paysages karstiques, représentant environ 10% de la surface de la terre.

Dans le secteur de la construction, les fines calcaires désignent des granulats de calcaire de petite taille obtenus par broyage de roches calcaires. Ces fines calcaires sont utilisées dans la fabrication de béton, d'enduits, de mortiers, de chapes et de dallages, offrant ainsi diverses applications dans l'industrie de la construction. Il est important de noter que l'extraction du calcaire a un impact sur l'environnement. Les sites d'extraction peuvent causer des dommages tels que l'érosion des sols et la dégradation des écosystèmes. Il est donc nécessaire de prendre des mesures pour minimiser ces effets négatifs et promouvoir des pratiques d'extraction respectueuses de l'environnement.

I.2.1.2. Le rôle des fines calcaires dans la formulation des BAP

Les fines calcaires jouent un rôle important dans la formulation des bétons auto-planants (BAP) en raison de leurs caractéristiques et de leurs effets bénéfiques.

- ✓ **Amélioration de la rhéologie:** Les fines calcaires contribuent à améliorer la rhéologie des BAP. Elles agissent comme des agents de remplissage, réduisant la viscosité du mélange et améliorant ainsi la capacité d'écoulement et la stabilité du béton. Cela permet d'obtenir un mélange plus fluide et auto-nivelant sans avoir besoin de vibration externe.
- ✓ **Optimisation de la compacité:** Les fines calcaires contribuent à optimiser la compacité du béton. Elles remplissent les vides entre les particules plus grosses, ce qui améliore la densité globale du mélange. Cela conduit à une meilleure résistance mécanique et à une diminution de la perméabilité, améliorant ainsi la durabilité du béton.
- ✓ **Renforcement mécanique:** L'incorporation de fines calcaires dans les BAP peut renforcer les propriétés mécaniques du béton. Les fines calcaires améliorent la distribution des particules dans la matrice du béton, ce qui contribue à une meilleure interconnexion entre les granulats et à une augmentation de la résistance à la compression, à la flexion et à la traction.
- ✓ **Amélioration de la durabilité:** Les fines calcaires peuvent également améliorer la durabilité des BAP. Elles réduisent la perméabilité du béton, limitant ainsi la pénétration de l'eau et des agents agressifs tels que les chlorures. Cela contribue à une meilleure résistance à la corrosion des armatures et à une plus grande durée de vie du béton.

Il convient de noter que les propriétés des fines calcaires peuvent varier en fonction de leurs caractéristiques spécifiques, telles que la granulométrie, la teneur en filler, la finesse, etc. De plus, l'incorporation des fines calcaires doit être soigneusement équilibrée avec les autres composants du BAP pour obtenir les performances souhaitées.

I.2.1.3. Production des fines calcaires

Les fines calcaires sont généralement produites comme sous-produit de divers processus industriels impliquant le calcaire. Les principales sources de production des fines calcaires:

Extraction et concassage de calcaire: L'une des principales sources de fines calcaires est l'extraction de calcaire dans les carrières. Le calcaire extrait est souvent broyé ou concassé

pour obtenir des granulats de différentes tailles, et les fines calcaires sont produites lors de ce processus de réduction de taille (figure I.1).



Figure I.1: Extraction du calcaire

Industrie de la construction: Lors de la production de matériaux de construction à base de calcaire, tels que le ciment, le béton ou les mortiers, des fines calcaires peuvent être générées. Par exemple, lors de la fabrication du ciment, le calcaire est broyé en une poudre fine pour être utilisé comme composant dans le mélange de ciment.

I.2.1.4. Impacte des fines calcaires sur l'environnement

Les fines calcaires peuvent avoir divers impacts sur l'environnement, selon la manière dont elles sont produites, utilisées et gérées. L'extraction des fines calcaires peut avoir un impact significatif sur l'environnement, notamment:

- ✓ Utilisation des ressources naturelles: L'exploitation des carrières (figure I.2) de calcaire pour produire des fines calcaires peut entraîner une surexploitation des ressources naturelles. Cela peut conduire à l'épuisement des gisements de calcaire, entraînant ainsi des impacts à long terme sur les paysages et les écosystèmes locaux.



Figure I.2: Exploitation des carrières

- ✓ Destruction des habitats naturels: L'extraction des fines calcaires (figure I.3) nécessite souvent la destruction de vastes zones de végétation et d'habitats naturels. Cela peut entraîner la perte de la biodiversité, la disparition d'espèces végétales et animales, ainsi que la fragmentation des écosystèmes.



Figure I.3: Destruction des habitats naturels

- ✓ Dégradation des sols: L'extraction de fines calcaires peut entraîner une dégradation des sols environnants (figure I.4). Les sols fertiles peuvent être enlevés ou contaminés par les activités minières, rendant difficile la repousse de la végétation et la régénération des écosystèmes.



Figure I.4: Dégradation des sols

- ✓ Modification des cours d'eau: L'extraction de fines calcaires peut perturber les cours d'eau à proximité. L'excavation de matériaux peut modifier le tracé des rivières, entraîner une érosion accrue des berges et réduire la qualité de l'eau en augmentant la turbidité et l'apport de sédiments.
- ✓ Consommation d'eau: L'extraction de fines calcaires peut nécessiter d'importantes quantités d'eau pour le processus d'extraction et la gestion des poussières. Cela peut entraîner une diminution des réserves d'eau disponibles, ce qui peut avoir un impact

sur la disponibilité de l'eau pour les écosystèmes locaux et les communautés environnantes.

- ✓ Pollution de l'eau lors de l'extraction des fines calcaires qui peut se produire de différentes manières:

*Déversement de produits chimiques: Pendant l'extraction des fines calcaires, divers produits chimiques peuvent être utilisés, tels que des explosifs, des solvants, des agents de séparation et des lubrifiants. Si ces produits chimiques sont mal stockés, manipulés ou éliminés, ils peuvent se déverser dans les cours d'eau à proximité, contaminant ainsi l'eau. Les produits chimiques peuvent altérer la qualité de l'eau et être nocifs pour les organismes aquatiques.

*Sédimentation: L'extraction des fines calcaires implique souvent des opérations de dynamitage et d'extraction mécanique, ce qui peut entraîner la libération de sédiments dans les eaux environnantes. Les sédiments peuvent être emportés par les eaux de ruissellement et se déposer dans les cours d'eau, les lacs ou les rivières à proximité. Cela peut obstruer les voies navigables, réduire la clarté de l'eau et perturber les habitats aquatiques.

*Ruissellement des eaux de surface: Les aires de stockage des matériaux extraits peuvent être exposées aux intempéries, ce qui peut entraîner le ruissellement des eaux de pluie sur ces surfaces. Le ruissellement peut entraîner la libération de contaminants tels que des métaux lourds, des hydrocarbures et d'autres substances chimiques présentes sur le site d'extraction. Ces polluants peuvent atteindre les cours d'eau et les sources d'eau souterraine, causant une pollution de l'eau (figure I.5).



Figure I.5: Pollution de l'eau

- ✓ Émissions de poussières: Les activités d'extraction de fines calcaires peuvent générer d'importantes quantités de poussières (figure I.6) qui peuvent se propager dans l'air et avoir un impact sur la qualité de l'air local. Ces particules en suspension peuvent être inhalées par les populations locales, ce qui peut entraîner des problèmes de santé respiratoire.



Figure I.6: Émissions de poussières

- ✓ Perturbation des écosystèmes aquatiques: Les activités d'extraction peuvent perturber les écosystèmes aquatiques locaux, en particulier si des cours d'eau sont détournés ou si des habitats aquatiques vitaux sont détruits (figure I.7). Cela peut affecter les populations de poissons, les écosystèmes aquatiques et les communautés qui en dépendent.



Figure I.7: Perturbation des écosystèmes

- ✓ Émissions de CO₂: La production de fines calcaires peut être associée à des émissions de dioxyde de carbone (CO₂), en particulier si elle nécessite des processus énergivores tels que le chauffage du calcaire, le transport avec des gros engins. Les émissions de CO₂ contribuent au changement climatique et à l'augmentation des concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère.
- ✓ Utilisation d'énergie: La transformation des fines calcaires en produits finaux peut nécessiter une consommation importante d'énergie et le transport à longue distance. Cela peut provenir de sources d'énergie non renouvelables, ce qui entraîne une plus grande empreinte écologique. L'utilisation d'énergies renouvelables pour ces processus peut réduire cet impact.

Il convient de noter que les impacts environnementaux spécifiques peuvent varier en fonction des méthodes d'extraction utilisées, des mesures de gestion mises en place et de la sensibilité de l'écosystème local.

L'utilisation progressive des fines calcaires dans les carrières algériennes a conduit à la production d'environ 15 millions de tonnes de sable concassé contenant un taux de fines de 14 à 20 % en poids (Safiddine et al. (2017)). Cela dépasse la limite standard autorisée de 7% (ASTM C33). Par conséquent, il est nécessaire de trouver d'autres matériaux sains et moins coûteux pour remplacer les fines calcaires afin de préserver les ressources naturelles qui est l'objet de cette étude qui vise la valorisation des cendres de biomasse comme remplacement des fines calcaires.

I.3. Valorisation des cendres de biomasse dans le domaine de génie civil

La valorisation et la réutilisation des déchets et en particulier les cendres d'origine végétales comme matériaux de génie civil utilisé soit dans la construction neuve ou dans la réhabilitation des vieux bâti de construction sont devenue un axe de recherche largement abordé du point de vue de son importance économique et écologique par la récupération de ces cendres soit comme ajout dans le ciment pour bissé leur cout de fabrication et limité les émissions de CO₂ , soit comme sable substitué partiellement un sable ordinaire dans les mortiers et les bétons. L'élimination des déchets d'origine végétal par leur valorisation et réutilisation dans le domaine de la construction permet de préserver l'environnement et conserver nos ressource naturelle et contribue au développement durable.

I.3.1. Différents type de cendres d'origine végétale utilisée comme matériaux de génie civil

Plusieurs types de déchets d'origine végétale ont été valorisés et réutilisés dans le ciment, mortiers et différents types de bétons

I.3.1.1. Cendres de paille



Figure I.8: Cendres de paille

Les cendres de paille (figure I.8) sont obtenues par la combustion de la paille, un sous-produit agricole. Elles peuvent être utilisées comme matériau de remplissage dans les applications de

construction. Les cendres de paille peuvent également être mélangées avec d'autres matériaux pour produire des panneaux de construction légers et isolants (Demin et al. 2021).

I.3.1.2.Cendre de balle de riz

Les cendres de balle de riz (figure I.9) sont des résidus qui résultent de la combustion des balles de riz, un sous-produit agricole. Elles contiennent une quantité élevée de silice et peuvent être utilisées comme filler dans le béton. Les cendres de riz peuvent également être utilisées pour stabiliser les sols et améliorer leurs propriétés mécaniques (Wilson 2012).



Figure I.9: Balle de riz

I.3.1.3.Cendres de coques de noix de palme

Les déchets de concassage du noyau et extraction des fibres des coques de noix de palme (figure I.10) ont été incinéré et valorisé comme ajout dans la fabrication d'un béton léger.



Figure I.10: Coques de noix de palme

I.3.1.4.Cendres de bagasse de cannes à sucre

La bagasse est un résidu fibreux qui reste après l'extraction du jus de la canne à sucre (figure I.11). Les cendres de bagasse sont obtenues par la combustion de la bagasse. Elles sont riches en silice et peuvent être utilisées comme filler dans la production un béton écologique avec des taux de 20 à 40% (Gauvin 2014, Rodier 2014).Les cendres de bagasse peuvent également être mélangées avec de l'argile pour produire des blocs de terre comprimée (Kumar et Barbato (2022)).



Figure I.11: Bagasse de canne à sucre

I.3.1.5.Cendre de grignons d'olives

L'activité des moulins à huile génère de quantités importantes des sous-produits appelés grignons d'olives, après combustion (figure I.12) de ces déchets ils peuvent être utilisés dans le domaine comme matériaux de construction et en particulier dans la confection d'un béton écologique (Cuenca et al. (2013)).



Figure I.12:Cendre de grignons d'olives

I.3.1.6. Cendres de biomasse (bois)

La cendre de biomasse (figure I.13) est le résidu minéral qui reste après la combustion de différentes formes de biomasse d'origine végétale. La biomasse englobe une variété de matériaux organiques tels que les résidus agricoles, les résidus forestiers, les cultures énergétiques et d'autres sources végétales. Lorsque la biomasse est brûlée, les matières organiques sont consommées, laissant derrière elles des résidus riches en minéraux. La composition chimique de la cendre de biomasse peut varier en fonction de la source spécifique de biomasse et des conditions de combustion.



Figure I.13: Cendre de biomasse

Elle peut avoir des utilisations dans l'agriculture, la production d'énergie ou d'autres applications où les minéraux contenus dans la cendre peuvent être bénéfiques. Les cendres de biomasse peuvent être utilisées comme substitut partiel du ciment dans la production de béton (Kim et al. (2022)).

Les cendres de bois, dans le contexte de la construction, se réfèrent aux résidus inorganiques qui restent après la combustion du bois. Lorsqu'on brûle du bois, les composants organiques se consomment, laissant derrière eux des résidus minéraux. La cendre de bois peut être réutilisée de différentes manières, notamment:

- ✓ Amendement pour le sol: La cendre de bois contient des nutriments tels que le potassium, le phosphore, le calcium et le magnésium, qui peuvent être bénéfiques pour les plantes. Elle peut être utilisée comme amendement (figure I.14) pour le sol afin d'améliorer sa structure et sa fertilité (McTavish et al. (2020)). Cependant, il est important de vérifier le pH de la cendre de bois, car elle peut être alcaline. Il est recommandé de l'utiliser avec précaution et de réaliser des tests de sol pour déterminer la quantité appropriée à appliquer.



Figure I.14: Cendres de bois comme amendement pour le sol

- ✓ Agent déneigeant: La cendre de bois peut être utilisée comme alternative aux produits chimiques déneigeant, tels que le sel de déneigement. Sa texture granuleuse lui permet de fournir une traction supplémentaire sur les surfaces glacées, tout en favorisant la fonte de la glace.
- ✓ Fabrication de savon: La cendre de bois peut être utilisée pour fabriquer du savon artisanal (figure I.15). Elle contient de la potasse, un ingrédient essentiel dans le processus de saponification. Les cendres de bois sont trempées dans de l'eau pour extraire les composés alcalins, puis la solution obtenue est utilisée comme base pour la fabrication du savon.



Figure I.15: Fabrication de savon à base de cendre de bois

- ✓ Répulsif contre les nuisibles: La cendre de bois (figure I.16) peut être utilisée pour repousser certains nuisibles tels que les limaces, les escargots et les fourmis. Elle peut être appliquée en tant que barrière autour des plantes sensibles pour les protéger des ravageurs. La texture abrasive de la cendre de bois peut également dissuader les insectes rampants de traverser les surfaces traitées.



Figure I.16: Cendre de bois comme répulsif contre les nuisibles

- ✓ Cultures énergétiques : Plantes spécialement cultivées pour la production de biomasse à des fins énergétiques, telles que le miscanthus, le switch grass, le saule énergétique, etc.

I.4.Travaux antérieures

L'utilisation de cendres issues des végétations (cendres de charbon, cendres de bois, cendres de palmier, cendres de bagasse a canne, cendres de balle de ris, cendres de grignon d'olive.....) a fait l'objet de nombreuses recherches en raison de l'activité pouzzolanique et/ou hydraulique de ces cendres (Villar-Cociña et al. (2008)).

Hosseini et al. (2015) ont travaillé sur la substitution du ciment d'un béton auto-plaçant par des cendres de carburant d'huile de palme, ils ont trouvés une amélioration dans les propriétés à l'état frais se situaient dans la limite des normes. La résistance à la compression augmentait avec l'augmentation du taux des cendres, tandis que la résistance à la flexion reste inférieure à la résistance du BAP de référence.

L'effet de la substitution partiel du ciment par des cendres de charbon et cendres de bois sur le comportement mécanique d'un BAP ont été étudié par Bhat (2021), les résultats ont montré que le remplacement de 10% du ciment par ces cendres donne des résistances similaires au BAP de référence. L'influence du remplacement partiel du ciment par des cendres de palmier sur le béton léger auto-compactant avec des taux allons de 10 à 50% ont été examiné par Olatokunbo et al. (2021), ils ont montré que le taux de remplacement optimal qui donne des résistances satisfaisantes est de 20%.

Moretti et al. (2018) ont évalué la faisabilité de l'incorporation de cendres de bagasse de canne à sucre comme matériau de remplissage dans la formulation de béton auto-compactant par le remplacement partiel du ciment par ce type de cendre, ils ont trouvé que pour un taux de substitution de 30% l'effet des cendres sur les BAP à l'état frais et sur la résistivité est insignifiant ce qui peut être du a la faible activité pouzzolanique.

Dans le but de diminuer les dépenses liées à la production d'un béton auto-plaçant, Akram et al. (2009) ont utilisés les cendre de bagasse de canne à sucre comme agent modificateur de viscosité de ce type de béton et étudier le cout relatifs des matériaux utilisés, les résultats

trouvés confirment la faisabilité du développement d'un béton auto-plaçant à faible coût à l'aide de cendre de bagasse, les propriétés à l'état frais étaient acceptables, les résistances à la compression à 28 jours étaient comparables au béton témoin et le coût des ingrédients du mélange de béton auto-plaçant spécifique est inférieur de 35,63 % à celui du béton témoin.

Gritsada et Natt (2013) ont réalisés une étude sur le remplacement partiel des granulats fin par des cendres de bagasse et fines calcaire d'un béton auto-plaçant. L'étude montre que la substitution de ces matériaux dans les granulats fins engendre une réduction de la densité et une augmentation de la fluidité par contre un blocage s'est produit dans les mélanges contenant 40 % de taux de remplacement. L'ajout de 20% de cendre entraine une amélioration dans les propriétés mécaniques en raison des effets de remplissage et des réactions pouzzolaniques (figure I.17).

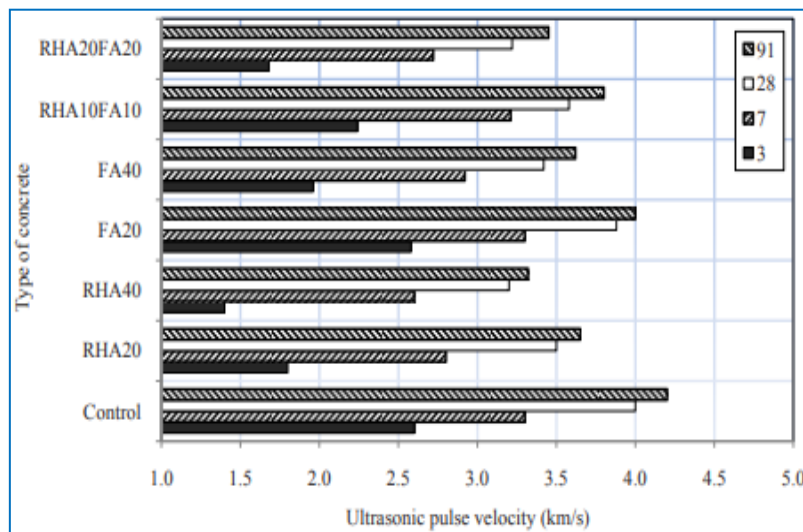


Figure I.17: Vitesse d'impulsion ultrasonique des mélanges des BAP (Gritsada et Natt 2013)

Hasnain et al. (2021) ont travaillé sur le remplacement du sable d'un béton auto-plaçant par des mélanges de cendres de balle de riz et cendre de bagasse et évalué leur effet sur les propriétés à l'état frais et physicomécanique, la résistance au sulfate et la microstructure. Ils sont révélés que la fluidité des mélanges était réduite en raison de la nature poreuse des cendres incorporées, tandis que la viscosité des mélanges s'améliorait lors de l'incorporation des mélanges de cendres mélangées. Les propriétés physico-mécaniques ont montré que l'incorporation de 20 % de cendres a produit un béton léger structurel avec des valeurs de résistance à la compression et de densité de 20 MPa et 1816 Kg/m³, respectivement. Le mélange des cendres améliore la résistance au sulfate des BAP et contribue à la formation d'un gel CSH secondaire en raison de la réaction pouzzolanique.

Cuenca et al. (2013) ont utilisé des cendres volantes issues de la combustion des grains de grignons d'olives comme filler dans le béton auto-plaçant. Les résultats montrent une bonne propriété auto-plaçant et des résistances mécaniques acceptables.

L'évaluation des propriétés d'un béton auto-plaçant contenant des cendres de sciure de bois (sawdustash) ont été étudié par Elinwa et al. (2008). Cette étude montre que le remplacement du ciment par 10% de ces cendres donne une amélioration dans les propriétés à l'état frais, et a la résistance en compression. Les cendres de sciure de bois peuvent différer la réaction d'hydratation du ciment et prolonger le temps de prise et ils réagissent avec Ca(OH)₂ libéré

lors de l'hydratation du ciment pour produire un gel C–S–H secondaire à l'intérieur de la pâte de ciment. La microstructure de la matrice de pâte de ciment est améliorée par cette gel et donne donc structure dense.

Les auteurs ont examiné les différents facteurs qui influencent la vitesse d'attaque acide des matériaux à base de ciment, tels que la nature de l'acide, la concentration de l'acide, la température, l'humidité, la porosité et la composition du matériau. Ils ont également discuté des mesures de protection possibles pour réduire l'attaque acide, telles que l'utilisation de revêtements de surface, de matériaux résistants à l'acide et de traitements de surface. Ils ont conclu que la vitesse d'attaque acide des matériaux à base de ciment dépend de nombreux facteurs, et que la protection contre l'attaque acide doit être adaptée en fonction des conditions d'exposition (figure I.18). Les mesures de protection doivent être choisies en fonction des propriétés du matériau et des conditions d'exposition, afin d'assurer une durabilité à long terme des structures en béton.

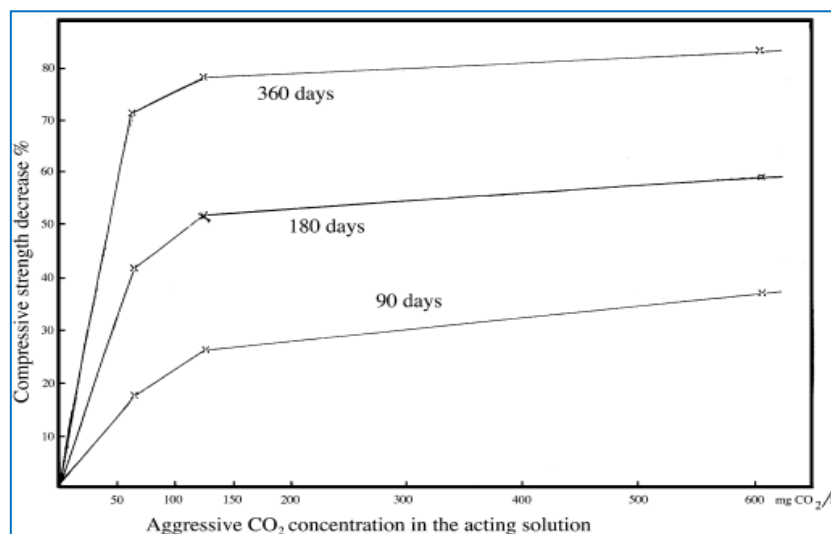


Figure I.18: Relation entre la diminution de la résistance à la compression et la concentration de CO₂ agressif dans la solution active après 90, 180 et 360 jours d'exposition (Elinwa et al. (2008)).

Da Luz et Sousa-Coutinho (2013), l'analyse de la résistivité à 78 jours n'a révélé aucune différence significative entre les trois mortiers analysés. Les mêmes résultats ont été obtenus pour la sportivité à 81 jours, à l'exception d'une légère augmentation pour 10% de cendres de fond. Les tests de diffusion du chlorure ont montré une perméabilité au chlorure légèrement plus élevée que celle du mortier témoin en ciment pur. Par conséquent, la durabilité du mortier n'a peut-être pas été améliorée car les cendres de fond se sont révélées cristallines et non pouzzolaniques, contrairement à d'autres types de cendres de bois (volantes). Cependant, les cendres de fond, en tant que matériau fin non vitreux, peuvent être utilisées comme charge dans les matériaux à base de ciment, entraînant une perte de durabilité marginale mais une résistance améliorée aux âges ultérieurs, contribuant ainsi à une construction durable.

Le travail de Wang et Baxter (2007) consiste à mener une étude complète sur l'utilisation des cendres volantes de biomasse dans le béton. Ils évaluent la résistance mécanique, étudient la microscopie pour étudier la structure et les propriétés des cendres volantes de biomasse, ainsi que leur interaction avec les autres composants du béton. Cela permet de mieux comprendre comment les cendres volantes de biomasse affectent les propriétés globales du béton. Les

résultats de cette étude peuvent contribuer à l'amélioration des pratiques de construction et de l'utilisation des matériaux de construction durables.

Ramos et al. (2013) étudie les propriétés d'un mortier fabriqué en utilisant des cendres de déchets de bois, en se concentrant sur la résistance mécanique, la résistance à la carbonatation et l'expansion due à l'ASR (figure I.19). Les résultats de cette étude contribueront à évaluer la viabilité de l'utilisation des cendres de déchets de bois comme matériau de substitution dans la fabrication du mortier et à comprendre comment cela peut affecter ses performances.

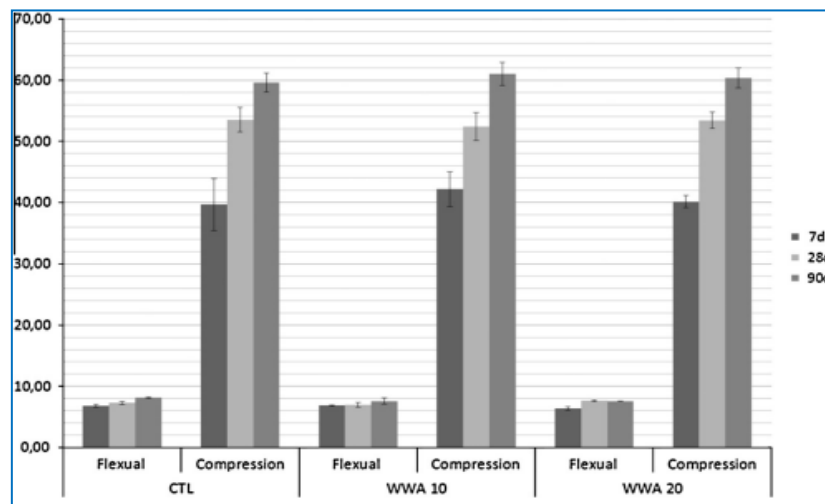


Figure I.19: Résistance à la flexion et à la compression des mélanges.

Tous ces travaux de recherche montrent l'importance de la valorisation des cendres issues des végétations comme des ajouts remplacent un ciment ou des granulats fins dans la formulation du béton auto-plaçant. Cette recherche vise à évaluer l'utilisation des cendre de bois résultants de l'incinération des forets et la combustion des déchets végétaux comme substituant partiel des fines calcaire dans la formulation d'un béton auto-plaçant dans le but de réduire le cout de production de ces fines et préserver les ressource naturelles d'où la protection de l'environnement.

I.5. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons données une banque de donnée sur la composition du béton auto-plaçant et en particulier les fines calcaires, leur production et leur impact sur l'environnement.

Nous avons signalé également les différents types de cendres valorisés dans le domaine de génie civil et quelques travaux antérieures sur l'utilisation des cendres dans les différents matériaux de construction et leur effet sur les propriétés à l'état frais et durci ainsi que sur les paramètres de durabilité.

Chapitre II

Caractérisation des matériaux

II. Caractérisation des matériaux

II.1. Introduction

Afin de formuler un béton qui doit répondre aux exigences demandées, il est souhaitable que ses constituants soient convenables aux normes en vigueur. Dans ce chapitre on présente tous les matériaux utilisés dans notre étude, leurs provenances et leurs propriétés (physiques, chimiques, minéralogiques et mécaniques, structurelle (DRX)). Ces matériaux sont: le ciment, les fines calcaires, les cendres de biomasse, le sable et les graviers, l'adjuvant (super plastifiant) et l'eau.

II.2. Caractérisation des matériaux

On a utilisé pour l'élaboration des bétons auto-plaçant des matériaux locaux dont les caractéristiques mécaniques et physiques ont été déterminées expérimentalement. Les matériaux utilisés sont:

- ❖ Un sable de carrière de classe 0/3 d'origine d'Om State, Constantine.
- ❖ Un gravier de carrière de classe 3/8 d'origine d'Om State, Constantine.
- ❖ Un gravier de carrière de classe 8/15 d'origine d'Om State, Constantine.
- ❖ Des Cendres de bois résultants de l'incinération des chutes de taille et de sciages des arbres fruitiers et des plantes nocives par les agriculteurs sans aucune transformation.
- ❖ Ciment CEM I 42.5 provenant de la cimenterie de M'sila.
- ❖ Fines calcaires provenant de la carrière de Ben-Azzouz- skikda.
- ❖ Adjuvant superplastifiant haut réducteur d'eau de type Master Glenium 3080.
- ❖ Eau de gâchage du robinet.

Des essais physiques, chimiques, mécaniques, DRX et FTIR ont été effectués au sein des laboratoires suivants:

- LNHC (Skikda),
- Laboratoire de génie civil de l'université Skikda,
- Laboratoire de Technologie des Matériaux Avancés, Ecole National Polytechnique de Constantine.

II.2.1. Essai sur granulats (sable et graviers)

Les granulats (sable et graviers) constituent le squelette du béton, et leur caractérisation constitue une étape importante dans la suite du protocole expérimental fixé.

II.2.1.1. Analyse granulométrique [NF EN 933-1]

La norme **NF EN 933-1** définit l'analyse granulométrique par tamisage comme un ensemble des opérations aboutissant à la séparation des grains selon leur dimension des éléments constituant l'échantillon (figure II.1), en employant des tamis à maille carrée emboîtés les uns sur les autres afin d'obtenir une répartition des masses des particules en fonction de leur dimension.



Figure II.1: Analyse granulométrique

Les résultats de l'analyse granulométrique des granulats sont donnés par le tableau II.1.

Tableau II.1: Résultats d'analyse granulométrique de sable et graviers									
Tamis en mm	Sable de carrière 0/3			Gravier 3/8			Gravier 8/15		
	Refus cumulés (g)	Refus cumulés (%)	Tamisât (%)	Refus cumulés (g)	Refus cumulés (g)	Tamisât (%)	Refus cumulés (g)	Refus cumulés (%)	Tamisât(%)
16							0	0	100
14							138	04.65	95.35
12.5							734	24.46	75.54
10				0	0	100	2244	74.81	25.19
8				62	03.12	96.88	2806	93.53	06.47
6.3				460	23.08	76.92	2970	99.00	01.00
4,00	0	0	100	1678	83.91	16.09			0
2,00	86.60	17.32	82.68	1944	97.23	2.77			
1,00	193.70	38.74	61.26			0			
0,5	280.3	56.06	43.94						
0,25	419.9	83.98	16.02						
0,125	486.00	97.20	2.8						
0,063	496.10	99.22	0.78						
T_n	0.3								
MF		2.93							

Les résultats de l'analyse granulométrique sont exploites par les courbes des analyses granulométriques (figure II.2).

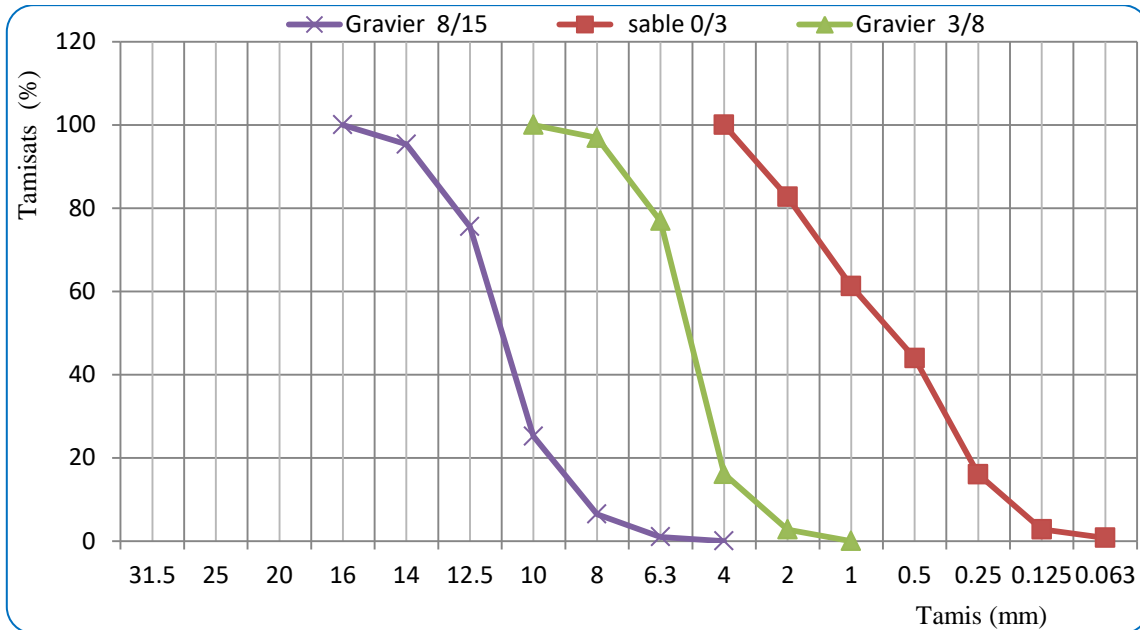


Figure II.2: Courbe d'analyse granulométrique des granulats

Les résultats des analyses granulométriques indique une bonne repartition granulométrique pour les trois types de granulats.

Le module de finesse est de 2.93, indique un sable grossier, l'utilisation de ce sable dans le BAP peut influencer sur l'ouvrabilité par contre il donne de bonne résistance.

II.2.1.2. Masse volumique apparente [NF P18-555]

La masse volumique apparente est mesurée par un récipient de un litre (figure II.3) conforme à la norme **NF P18-555**.



Figure II.3: Mesure de la masse volumique apparente

Les résultats des mesures des masses volumiques apparentes sont donnés par le tableau II.2.

Tableau II.2: Masse volumique apparente de sable de graviers	
Désignations	Masse volumique apparente (g/cm ³)
Sable de carrière 0/3	1.450
Gravier de carrière 3/8	1.480
Gravier de carrière 8/15	1.460

Les masses volumiques apparentes sont courantes.

II.2.1.3. Masse volumique absolue [NF EN 1097-6]

La masse volumique absolue (NF EN 1097-6), est la masse par unité de volume absolue du corps sans tenir an compte du volume des vides et des pores. Les résultats de cet essai sont notés dans le tableau II.3.

Tableau II.3: Masse volumique absolue de sable de graviers	
Désignations	Masse volumique apparente (g/cm ³)
Sable de carrière 0/3	2.660
Gravier de carrière 3/8	2.700
Gravier de carrière 8/15	2.730

D'après les résultats des masses volumiques absolues, le sable et graviers présentent des densités absolues courantes ce qui résulte qu'on peut utiliser ces matériaux dans la formulation de ce BAP.

II.2.1.4. Equivalent de sable [NF EN 933-8]

La propreté du sable est évaluée par l'essai équivalent de sable (figure II.4) conformément au prescription de la norme NF EN 933-8 et les résultats obtenus sont notées au tableau II.4.

Tableau II.4: Equivalent de sable			
Désignations	Nature	ES (%)	Moyenne
Sable de carrière 0/3	Echantillon [*] 1	65.83	65%
	Echantillon [*] 2	63.86	

L'équivalent de sable mesuré par piston est de 65%, indique un sable propre utilisable pour la confection des BAP.



Figure II.4: Equivalent de sable

II.2.1.5. Bleu de Méthylène [NF EN 933-9]

La valeur de bleu de méthylène mesuré selon la norme NF EN 933-9 (figure II.5) est donnée par le tableau II.5.

Tableau II.5: Mesure de valeur au bleu de Méthylène	
Echantillons	Sable de carrière 0/3
Masse sèche de la prise d'essai (M1) g	100
Volume du bleu introduit (V1) ml	7
Valeur au bleu de méthylène %	0.7



Figure II.5 : Essai au Bleu de Méthylène

II.2.1.6. Absorption d'eau [NF EN 18-555]

Le rapport de l'augmentation de la masse d'un échantillon après imbibition par immersion de l'échantillon dans l'eau pendant 24 heures à 20° C à la masse sèche de l'échantillon donne le coefficient d'absorption d'eau. Les résultats sont présentés dans le tableau II.6.

Tableau II.6: Coefficient d'absorption d'eau de sable et graviers	
Désignations	Masse volumique absolue (g/cm ³)
Sable de carrière 0/3	0.80
Gravier de carrière 3/8	1.06
Gravier de carrière 8/15	1.60

Le coefficient d'absorption du sable est de 0.80 inférieur à 5%, indique qu'on peut obtenir un BAP durable par l'utilisation de ce sable.

II.2.1.7. Dureté (résistance au choc [NF EN 1097-2] et à l'usure [NF EN 1097-1])

Les résultats des essais Los-angles et Micro-Deval sont représentés sur le tableau II.7.

Tableau II.7: Résultats des essais de duretés		
Echantillon		Classe granulaire 10/14
Coefficient Los-angles	LA (%)	19.70
Micro-Deval	MDE (%)	17.20

D'après les résultats obtenus on peut dire que les granulats sont durs.

II.2.1.8. Coefficient d'aplatissement [NF P18-561]

La forme d'un granulat est donnée par le coefficient d'aplatissement qui donne des indications sur le pourcentage des éléments plat dans un échantillon de gravier. Les résultats de cet essai sont donnés par le tableau II.8.

Tableau II.8: Coefficient d'aplatissement	
Echantillon	A (%)
Gravier de carrière 3/8	20
Gravier de carrière 8/15	21

Le coefficient d'aplatissement des deux types de graviers est inférieure à 30%, une mauvaise forme augmente la demande en eau et influe sur la maniabilité.

II.2.1.9. Analyse chimique [NFP 18 - 011]

L'analyse chimique a été effectuée au laboratoire **LNHC -Skikda**. Les résultats obtenus sont donnés dans le tableau II.9.

Tableau II.9: Analyse chimique de sable et graviers	
Désignations	Résultats en (%)
CaCO ₃	91.60
Cl ⁻	0.04
SO ₃	Traces

Les analyses chimiques de sable et gravier donnent un pourcentage de **CaCO₃** de 91.60%, ce qui indique que ces matériaux sont de nature calcaires. L'utilisation de ce type de granulats dans la confection des BAP donne un bon collage matrice/granulats.

II.2.2. Ciment

Pour la confection des BAP, On a utilisé un CEM I de classe 42,5 (figure II.6), provenant de la cimenterie de de M'sila.



Figure II.6: CPA-CEM I de M'sila

➤ Les essais effectués sur la poudre de ciment sont:

***La densité** est 3.10g/cm³ ont été déterminée par un densimètre le Chatelier en utilisant l'acétone (figure II.7).



Figure II.7: Mesure de la densité

*La surface spécifique de Blaine [EN 196-1] est de 2343 Cm²/g ont été mesuré par la méthode de perméabilité à l'air (figure II.8) conformément à la norme EN 196-1.



Figure II.8: Mesure de la SSb

*L'analyse chimique ont été faite par diffraction par rayon« X »et par la méthode classique. Les caractéristiques chimiques et minéralogiques sont présentées dans le tableau II.10.

Tableau II.10: Composition chimique et minéralogique du CEM I

Désignation	Résultats en %	Désignation	Résultats en %
CaO	62.85	CaO libre	0.5
Al ₂ O ₃	5.02	MS	2.43
Fe ₂ O ₃	3.14	MAF	0.88
SiO ₂	21.01	C3S	61.00
MgO	1.85	C2S	14.50
Na ₂ O	0.11	C3A	2.40
K ₂ O	0.45	C4AF	15.22
Cl ⁻	0.017	PF	0.21
SO ₃	2.04	--	--

*Les propriétés physiques et mécaniques sont présentées dans le tableau II.11.

	2jours	7jours	28jours
Résistance en traction par flexion en MPa	5.01	6.45	8.97
Résistance en compression en MPa	19.6	37.48	44.10
La prise	Début de prise	Fin de prise	/
	4h 6mn	5h 6mn	/

II.2.3. Fines calcaires

Les fines calcaires (figure II.9) provenant de la carrière de Ben Azzouz présentent un passant au tamis 0.08mm de l'ordre de 75%, les propriétés de ces fines sont présentées dans le tableau II.12.



Figure II.9: Fines calcaires de la carrière de Ben Azzouz

Masse volumique absolue (g/cm^3)	2.740
La surface spécifique de Blaine (cm^2/g)	3526
CaO (%)	55.80
SiO_2 (%)	0.14
Al_2O_3 (%)	0.01
Fe_2O_3 (%)	0.01
Na_2O (%)	0.01
Cl^- (%)	0.21

Les fines calcaires contiennent des pourcentages essentiellement composée de carbonate (55.80%). La présence du CaCO_3 accélère l'hydratation du C_3S par la formation de carbo-aluminate de calcium ce qui augmente des résistances mécanique au jeune âge.

II.2.4. Cendres de bois

Les cendres de bois (figure II.10) sont obtenues par incinération des chutes de sciages des arbres et des plantes nocives par les agriculteurs sans aucune transformation. Les cendres ont subi une opération de tamisage dans le tamis 400mm pour éliminer les impuretés et obtenir un produit exempt d'éléments grossiers indésirables et pour atteindre la finesse voulue.



Figure II.10: Cendres de bois

Les analyses chimiques des cendres sont données par le tableau II.13.

Désignation	Résultats en %
Masse volumique absolue (g/cm^3)	2.330
La surface spécifique de Blaine (cm^2/g)	4244
CaO	32.01
Al_2O_3	1.10
Fe_2O_3	1.10
SiO_2	10.16
MgO	8.30
PF	40

D'après les analyses chimiques (tableau II.13), les cendres de bois présente une quantité de CaO de l'ordre 32.01% inférieur à celle des fines calcaires, cette quantité indique que les cendres de bois pourrait être hydrauliquement réactive (Rajamma et al. (2009))

La teneur en silice SiO_2 est de 10.16%, la présence de cet élément peut augmenter la résistance du béton à long terme.

D'autres substances, à savoir Fe_2O_3 , MgO et Al_2O_3 , ont été détectées en quantités mineures.

La teneur élevée des matières organiques dans les cendres (perte au feu égale à 40%) qui est probablement due à la décomposition thermique partielle des phases de carbonate de calcium en oxyde de calcium, suivie par la libération de dioxyde de carbone (Zelic et al. (2000)) augmente la demande en eau et diminue la majorité des oxydes et affecte la réaction pozzolanique (Ayobami 2021).

La distribution granulométrique du ciment, fines calcaires et cendres de bois est donnée par la figure II.11.

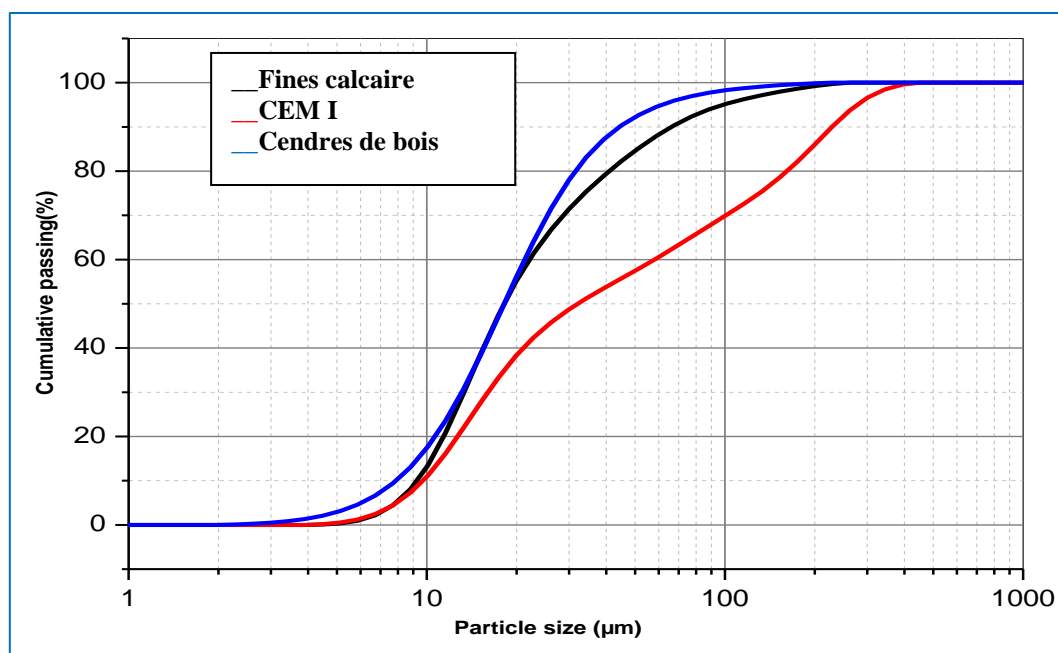


Figure II.11: Distribution granulométrique de la cendre de bois, fine calcaire, ciment

La figure II.11 indique que les trois courbes se prolongent en douceur et présentent une distribution granulométrique favorable, la cendre de bois étant plus fine que les fines calcaire et le ciment, respectivement. On peut en déduire que l'incorporation de cendre de bois améliore la compacité du BAP.

Les résultats de l'étude structurale par DRX du ciment, fines calcaires et cendres de bois sont donnés par la figure II.12.

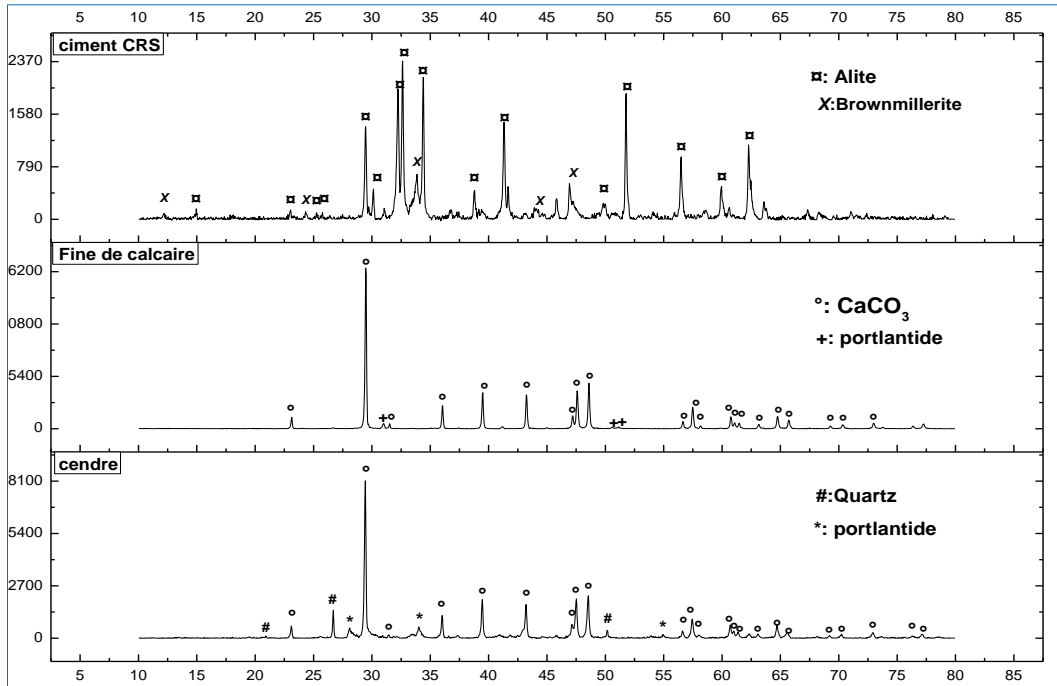


Figure II.12: DRX de ciment, fines calcaires et cendres de bois

Le spectrogramme de la cendre de bois (figure II.12) a montré une structure cristalline, représentée par des pics nets en plus d'une ligne de base horizontale. La présence de quartz et de carbonate de calcium (CaCO_3) a été détectée dans ce matériau comme étant les phases majeures et le portlandite comme phase mineure.

La phase minéralogique du carbonate de calcium, lorsqu'elle est utilisée comme liant supplémentaire en conjonction avec le ciment Portland, peut agir pour accélérer le taux d'hydratation de la phase minéralogique C3S qui est présent dans le ciment Portland (Kakali et al. (2000), Lothenbach et al. (2008)). Ce mécanisme est bénéfique pour le gain rapide de résistance du mélange cimentaire contenant des cendres de bois au premier âge d'hydratation. En outre, les cendres de bois, qui sont riches en minéral et en Portlandite, peut être utilisé de manière appropriée en combinaison avec un matériau en poudre riche en silice.

Un dosage précoce de Portlandite est utilisé pour accélérer la formation du gel C-S-H par une réaction d'hydratation secondaire.

II.2.5. Adjuvant

Le super plastifiant qu'on utilise dans notre étude Master Glenium3080 (haut réducteur d'eau conforme à la norme NFEN-2), est un super plastifiant haut réducteur d'eau nom chlore et prête à l'emploi base de poly carboxylate modifiés qui se présente sous la forme d'un liquide marron.

II.2.6. Eau de gâchage

L'eau de gâchage utilisée provient du robinet sa température est de 28°C . L'analyse chimique est représentée dans le tableau II.14, les résultats montrent qu'elle répond à toutes les prescriptions des normes **NF P18-404**.

Tableau II.14: Analyse chimique de l'eau de gâchage

Paramètres	Résultat	Unité	Observation
T°	28	C°	Turbidité:1,44ntu Eau de bonne qualité chimique
Ph	7.5	--	
Cl	0.1	Mg/l	
TDS	297	Mg/l	
Conductivité	541	Us/cm	
Salinité	0.2	--	

II.3. Conclusion

D'après les essais de caractérisation des matériaux on peut conclure que:

-Les cendres de bois présentent une masse volumique absolue très faible en comparaison avec les fines calcaires ce qui implique que la substitution de ces fines par les cendres rend le béton plus léger.

-La surface spécifique des cendres de bois montre que sa finesse est plus grande par rapport aux fines calcaires cette propriété peut affecter sur la demande en eau et la densité.

-Les fines calcaires sont constituées principalement de carbonate (55,80%). Le CaCO_3 favorise l'hydratation du C_3S en formant du carbo-aluminate de calcium, ce qui améliore la résistance mécanique du béton à un stade précoce de son durcissement.

-Les cendres renferment des éléments tels que la silice et la chaux qui favorisent l'augmentation des résistances.

-La teneur élevée en matières organiques dans les cendres de bois peut affecter les résistances mécaniques et augmenter la demande en eau.

Chapitre III

Programme expérimental et méthodologie d'essai

III. Programme expérimentale et méthodologie d'essais

III.1. Introduction

Dans ce chapitre on présente le programme expérimental et la méthode de formulation utilisé pour réaliser ce programme ensuite une description détaillée sur les différentes méthodes des essais effectuées sur l'ensemble du programme. On présente également les différents paramètres fixes et variables et les méthodes de préparation des mélanges des BAP.

III.2. Programme expérimental

L'objectif de ce travail est de valorisé et évalué le potentiel de l'utilisation des cendres de bois en tant que substituant des fines calcaires dans la composition d'un béton auto-plaçant avec des taux allons de 0 à 24% avec un pat de 6% ensuite étudie l'effet de substitution partielle de ces fines calcaires par des fines de cendres de bois sur les propriétés physiques, mécaniques, de durabilité et microstructures.

III.2.1. Etude de la composition des mélanges selon la méthode de Shen

Le BAP de référence (0%) a été formulé par la méthode de LGC proposée par Shen et al. (2008) Cette méthode permet d'optimiser le compactage des granulats et assure une bonne fluidité des BAP avec les paramètres fixes sont le rapport $E/L=0,43$ et $G/S=1$. Les autres formulations ont été obtenue par la même méthode on substitue le volume des fines calcaires par des volumes de cendres de bois.

Tout d'abord, il est nécessaire de déterminer le compactage maximal du granulat (figure III.1) en mesurant sa masse volumique avec différents rapports de sable sur le granulat. Cette mesure permet de calculer la quantité de liants nécessaires (ciment et addition minérale) en se basant sur la résistance à la compression souhaitée pour le BAP. Ensuite, il est important que les pâtes formant le liant (ciment et addition minérale) aient la même fluidité pour assurer une distribution uniforme des matériaux dans le mélange.

Le dosage du superplastifiant du BAP est déterminé en fixant une valeur cible d'étalement à l'aide de l'essai d'étalement au cône d'Abrams. Cette valeur cible permet de contrôler la fluidité et la maniabilité du BAP.

Une fois le mélange malaxé, des essais de vérification à l'état frais sont effectués pour confirmer la formulation du BAP. Ces essais incluent l'étalement au cône d'Abrams, l'écoulement à la boîte en L, la stabilité au tamis et l'écoulement à l'entonnoir.

Cette méthode de formulation de BAP repose sur une approche scientifique précise pour obtenir un béton auto-plaçant de qualité, en ajustant les proportions des différents matériaux et en vérifiant leur maniabilité et leur stabilité à l'état frais.

Dans ce travail, les classes correspondantes aux utilisations normales du BAP sont choisies:

- *Diamètre d'étalement: 660-750mm
- *Temps de passage à l'entonnoir: 9-25s
- *Rapport de remplissage >0.80
- *Taux de ségrégation <15%
- *La résistance envisagée du BAP à 28 jours 50 MPa
- *Type de ciment: CEM I 42.5 de masse spécifique 3100 kg/m³ et de $f_{c28} = 44.1$ MPa

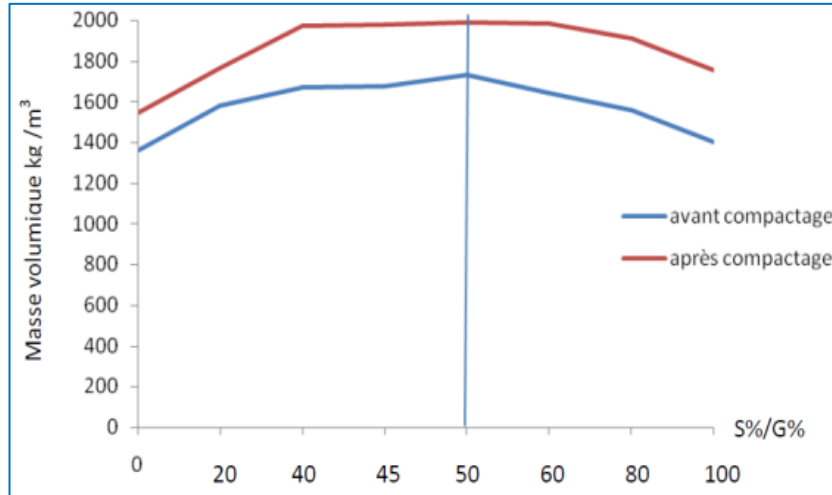


Figure III.1: Diagramme de l'essai de compactage selon ASTM C29/C29m (Shen et al. (2008))

** Granulat

* Essai de compactage

Le rapport optimal entre le sable et le granulat ($R_{sable/granulat}$) se situe au sommet de la courbe après le compactage, où le facteur de compactage (PF), c'est-à-dire le rapport entre la masse volumique du granulat avant et après compactage, est obtenu.

$$PF = \rho_{\text{après}} / \rho_{\text{avant}}$$

*Quantité de granulat

Afin de déterminer les volumes, V_{sable} et $V_{gravillon}$, deux conditions peuvent être établies:

$$\frac{\rho_s V_s}{\rho_s V_s + \rho_g V_g} = R_{s/gr}$$

$$V_{sable} + V_{gravillon} = 1$$

Le rapport optimal sable /granulat ou la compacité est maximale $R_{s/gr} = \frac{50}{100} = 0.5$

La masse finale de granulat dans un volume unitaire est obtenue en utilisant la définition de PF :

$$M_a = PF(m_s + m_g) = PF(\rho_s V_s + \rho_g V_g)$$

****Pâte**

***Volume de la pate**

$$V_p = 1 - \frac{M_s}{1000 d_a}$$

d_a : est la gravité spécifique des granulats

$$V_p = 1 - V_{agre}$$

***Quantité du liant utilisé**

$$L = C + K.A$$

L'indice d'activité de l'ajout (dans notre cas des fines de calcaire on a $K = 0$, donc la quantité de liant est égale la quantité des ciments

La quantité d'eau nécessaire pour ce liant est calculée par la formule de Bolomy avec G lié à la propriété des granulats dans notre cas $G = 0.57$.

$$a f_{c28} = G f_{ce28} \left(\frac{L}{E} - 0,5 \right)$$

Donc

$$L/E=0.40$$

***Quantité des ciments et des fines calcaire**

$$C = \frac{1000(V_p - V_{air})}{\left(\frac{1}{d_c} + \frac{m}{d_f} + \frac{1 + km}{d_w \left(\frac{f_c}{G f_{cem}} + 0,5 \right)} \right)} \dots \dots \dots F = mC$$

$$\left\{ \begin{array}{l} m = 0,11, \quad \text{pour } \frac{F}{(F + C)} = 10\% \\ m = 0,18, \quad \text{pour } \frac{F}{(F + C)} = 15\% \\ m = 0,25, \quad \text{pour } \frac{F}{(F + C)} = 20\% \end{array} \right.$$

***Quantité de fines de calcaire**

$$F = \frac{\left(\frac{f_c}{G f_{cem}} + 0,5 \right) \left(1000(V_p - V_{air}) - \frac{C}{d_c} \right) - \frac{C}{d_w}}{\frac{k}{d_w} + \frac{1}{d_f} \left(\frac{f_c}{G f_{cem}} + 0,5 \right)}$$

***Quantité d'eau**

$$V_c = \frac{C}{1000d_c} \quad V_f = \frac{F}{1000d_f}$$

$$W = 1000d_w(V_P - V_c - V_f - V_{air})$$

***Dosage en adjuvant**

Pour atteindre l'étalement visé sur les pates (ciment, fines), on utilisant 1.5% de superplastifiant en masse.

La quantité de superplastifiant est calculée par $SP = n \times (C+F+S+G)$
 Le pourcentage de l'adjuvant $SP\% = SP \times (C+F) / 100$
 La correction du dosage en eau: $E = E - (0.7 \times SP)$

III.2.2. Composition des mélanges

Les différentes compositions des mélanges des bétons sont présentées dans le tableau III.1. Les paramètres fixes sont:

- Rapport E/C égale à 0.44
- Dosage en adjuvant 1.5
- Squelette granulaire continue.

Les paramètres variables sont les taux de substitution 6%, 12%, 18% et 24%

Tableau III.1: Différentes compositions utilisées dans l'étude	
Notation	Type de béton
B (0%)	BAP témoin à base de CEM I et fines calcaires et granulats concassés de provenance la carrière de Constantine.
B (6%)	BAP à base de CEM I et 94% de fines calcaires et 6% de cendres de bois et granulats concassés de provenance la carrière de Constantine.
B (12%)	BAP à base de CEM I et 88% de fines calcaires et 12% de cendres de bois et granulats concassés de provenance la carrière de Constantine.
B (18%)	BAP à base de CEM I et 82% de fines calcaires et 18% de cendres de bois et granulats concassés de provenance la carrière de Constantine.
B (24%)	BAP à base de CEM I et 76% de fines calcaires et 24% de cendres de bois et granulats concassés de provenance la carrière de Constantine.

✓ **Essais réalisés sur BAP à l'état frais**

On a effectué sur le béton frais des mesures de:

- La densité,
- Etalement au cône d'Abrams,

- L'air occlus,
- Boite en L,
- V funnel,
- Stabilité au tamis.

✓ **Essais réalisés sur BAP à l'état durci**

Les essais réalisés sur le béton auto-plaçant à l'état durci sont:

- Résistance à la compression à 7, 28 et 90jours,
- Résistance à la traction par flexion à 7, 28 et 90jours,
- Essai auscultation a 28jours,
- Essai ultrasonique a 28jours,
- Essai absorption d'eau par immersion,
- Essai absorption d'eau par capillarité,
- Pénétration de chlorure 28jours,
- Attaque chimique,
- Microstructure.

III.2.3. Formulation des mélanges

Cinq formulation ont été retenues et présenté dans le tableau III.2.

Désignations	Ciment Kg	Fines Calcaires Kg	Cendres De bois Kg	SP L	Eau L	Sable 0/3 Kg	Gravier 3/8 Kg	Gravier 8/15 Kg
B(0%)	442	80	0	7.8	229	816	429	419
B(6%)	442	75.2	4.8	7.8	229	816	429	419
B(12%)	442	70.4	9.6	7.8	229	816	429	419
B(18%)	442	65.6	14.4	7.8	229	816	429	419
B(24%)	442	60.8	19.2	7.8	229	816	429	419

III.2.4. Fabrication des mélanges

-Malaxage

Le malaxage ont été faite dans un malaxeur à axe vertical du laboratoire de LNHC (figure III.2), l'introduction des matériaux dans la cuve est de l'ordre:

- Gros éléments,
 - Ciment, fine calcaire et cendre de bois,
 - Sable,
 - Eau et adjuvant.



Figure III.2: Malaxeur utilisé.

Le temps de malaxage suivant la norme NF P 18-404, Le processus de fabrication (figure III.3) s'effectue de la manière suivante:

- Le pré-mouillage du malaxeur vise à limiter l'absorption d'eau supplémentaire par les parois du malaxeur lors du gâchage.
- L'introduction des constituants solides se fait en deux étapes, en commençant par les granulats, suivis des fines calcaires et du ciment.
- Malaxage puis on ajoute l'eau et l'adjuvant.

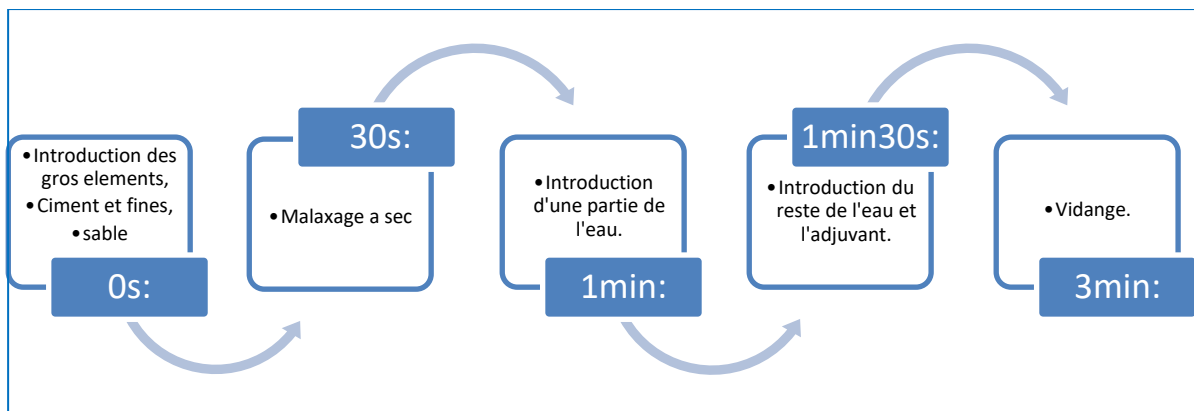


Figure III.3: Les phases de malaxage

- Moules

Les moules utilisés sont en acier et les différents corps d'éprouvettes sont:

- Cubiques: 15x15x15 cm pour l'essai de compression,
- Prismatiques: 7x7x28 cm pour l'essai de traction par flexion,
- Cubique: 20x20x20 cm pour l'essai d'auscultation et ultrason,
- Cubiques: 10x10x10 cm pour l'essai d'absorption d'eau par immersion,
- Prismatiques: 7x7x28 cm pour l'essai d'absorption capillaire,
- Cubiques: 10x10x10 cm pour l'essai pénétration de chlorure.
- Cubiques: 07x07x07 cm pour l'essai de l'attaque chimique.

-Remplissage et vibration

Le remplissage des moules ont été faite par couche en fonction des dimensions de chaque type de moule. La mise en place du béton auto-plaçant dans les moules a lieu sans vibration, l'arasement ont été faite par une règle métallique.

-Conservation des éprouvettes

Les éprouvettes avant le décoffrage (figure III.4) sont conservées dans le laboratoire pendant $24h \pm 1h$ à une température de $20C \pm 2$: humidité relative $60\% \pm 5$.



Figure III.4: Les moules utilisés.

Après le décoffrage, les éprouvettes sont conservées (figure III.5) selon les conditions de chaque essai:

- A l'eau jusqu'à le jour de l'essai pour les essais de compression et de traction par flexion.
- A l'eau jusqu'à 28jours pour les essais d'auscultation et ultrason et pénétration de chlorure et attaque chimique.
- A l'air jusqu'à 28jours pour les essais d'absorption d'eau par immersion et capillaire.



Figure III.5: Conservation des éprouvettes.

III.3. Méthodes d'essais

III.3.1. Essai sur béton frais

III.3.1.1. Essai d'étalement (Slump Flow)[NF EN 12350-8]

L'essai (figure III.6) consiste à remplir le cône d'Abrams avec le béton auto-plaçant, puis à le soulever lentement et à le laisser se déverser sur une plaque de support propre et humidifiée. L'étalement est mesuré en prenant la moyenne des deux diamètres perpendiculaires de la galette de béton obtenue qui doit être comprise entre 600 mm et 800 mm selon les recommandations de la norme EN 12350-8. L'étalement doit être mesuré au plus tard 5 minutes après la fin du malaxage du béton.

Les différentes classes d'étalement ont été définies:

- Classe SF1 : étalement compris entre 550 et 650 mm
- Classe SF2 : étalement compris entre 660 et 750 mm
- Classe SF3 : étalement compris entre 760 et 850 mm



Figure III.6: Essai d'étalement

III.3.1.2. Air occlus [NF EN 12350-7]

Conformément à la norme NF EN 12350-7, le pourcentage d'air occlus dans le béton ont été mesuré par un aéromètre à béton (figure III.7). La chambre inférieure de l'aéromètre est remplie par le béton, une pression est appliquée à l'aide d'une pompe manuelle intégrée sur la chambre supérieure qui est soigneusement fixée jusqu'à ce que l'aiguille du manomètre indique 0%. À ce moment, la valve qui sépare les volumes des deux chambres est ouverte, ce qui comprime le béton et affiche directement le pourcentage d'air occlus sur le manomètre.



Figure III.7: Aéromètre à béton

III.3.1.3. Densité [NF EN 12350-6]

La norme NF EN 12350-6 décrit la méthode d'essai pour mesurer la densité du béton frais. Pour réaliser cet essai (figure III.8), les poids du moule 20x20x20 cm vide P_v et rempli par le béton P_r , ont été mesurés. Si V est le volume du moule, la densité du béton D_0 est donnée par la relation:

$$D_0 = (P_r - P_v) / V \quad (\text{g/cm}^3)$$



Figure III.8: Mesure de la densité

III.3.1.4. Essai de la boîte en L [NF EN 12350-10]

La norme EN 12350-10 décrit la méthode d'essai de la boîte en L (figure III.9) pour mesurer la mobilité du béton en milieu confiné et pour éviter les problèmes de blocage ou de ségrégation lors de la mise en place du béton. Pour effectuer cet essai, une boîte en L est utilisée, où la partie verticale est remplie de béton et la partie horizontale comporte un ferrailage avec une distance libre entre les barres de 39 mm. Une fois que le béton a reposé pendant une minute, la trappe est levée et le béton s'écoule à travers le ferrailage dans la

partie horizontale de la boîte. Les hauteurs H1 et H2 sont mesurées lorsque le béton ne s'écoule plus, et le taux de remplissage H2/H1 est calculé et utilisé comme indication de la capacité de remplissage du béton. Si des amoncellements de granulats se produisent en aval du ferrailage, cela indique un problème de blocage ou de ségrégation.



Figure III.9: Essai de la boîte en L

III.3.1.5. Essai de stabilité au tamis [NF EN 12350-11]

Cet essai a pour objectif d'évaluer la qualité des bétons auto-plaçant en termes de risque de ségrégation. Le processus de test implique l'utilisation d'un seau de 10 litres avec un couvercle, d'un tamis de 5 mm de diamètre de 315 mm avec un fond, et d'une bascule de portée minimale de 20 kg et de précision de 20 g (figure III.10). Après avoir versé 10 litres de béton dans le seau et attendu 15 minutes, un échantillon de 4,8 kg est prélevé et versé sur le tamis. Deux minutes plus tard, la quantité de pâte ayant traversé le tamis est mesurée, et le pourcentage en poids de laitance par rapport au poids de l'échantillon donne l'indice de ségrégation π . Les résultats de l'essai permettent de classer les formules de béton auto-plaçant selon leur stabilité, avec un indice de ségrégation:

- $0 \leq \pi \leq 15$ % stabilité satisfaisante.
- $15 \% \leq \pi \leq 30\%$ stabilité critique, l'essai à refaire in situ.
- >30 % stabilité très mauvaise, béton inutilisable.



Figure III.10: Essai de stabilité au tamis

III.3.1.6. Essai V funnel [NF EN 12350-9]

Cet essai (figure III.11) décrit dans la norme NF EN 12350-9 est utilisée pour évaluer la fluidité d'écoulement des bétons auto-plaçant. L'essai consiste à mesurer le temps qu'il prend pour que le béton s'écoule à travers un entonnoir en forme de V. La différence entre le temps de remplissage initial et le temps d'écoulement total est divisée par le temps de remplissage initial pour donner le rapport d'écoulement V-funnel. La norme spécifie des limites pour ce rapport d'écoulement qui est de [8-12s].



Figure III.11: Essai V funnel

III.3.2. Essai sur béton durci

III.3.2.1. Essai de compression

L'essai de compression (figure III.12) selon la norme NF EN 12390-3 consiste à appliquer une charge de compression axiale sur une éprouvette de béton jusqu'à la rupture. Les éprouvettes utilisées sont cubiques (15x15x15 cm). Si la surface de l'éprouvette est S (mm²) et la charge maximale enregistré au cours de l'essai est notée P (N), la résistance à la compression F_c est calculée par la relation:

$$F_c = P / S \quad (\text{N/mm}^2)$$



Figure III.12: Essai de compression

III.3.2.2. Essai de traction par flexion [EN 12390-5]

La résistance à la traction par flexion ont été mesurée à l'aide d'une machine de flexion à 3 points de 100 kN de charge (figure III.13) sur des éprouvettes de dimensions 7x7x28 cm. Après avoir correctement centré l'éprouvette sur les appuis de la machine, une charge a été appliquée progressivement jusqu'à la rupture. La contrainte de traction par flexion obtenue au moment de la rupture de l'éprouvette est donnée par la relation:

$$R_t = 1,5FL/b^3 \text{ (N/mm}^2\text{)}$$

F : Charge appliquée en N,
Ll : Distance entre les appuis (mm),
b : Coté de l'éprouvette en mm.



Figure III.13: Essai de flexion

III.3.2.3. Essai au scléromètre [NF EN 12504-2]

L'essai au scléromètre est une méthode non destructive qui permet d'estimer la résistance du béton conformément à la norme NF EN 12504-2. Cette méthode permet de mesurer la dureté a la surface du béton et évaluer la qualité globale de l'ouvrage. Après avoir placé les points de mesure sur la surface de l'éprouvette conformément à la norme, l'éprouvette est fixée entre les deux supports d'une presse de compression, puis le scléromètre est appliqué aux points de mesure. La tige en acier sort du cylindre, appuie sur le béton et comprime un ressort. Ce ressort projette ensuite une masse dans la tige, qui revient à la surface du béton et entraîne le curseur de retour, permettant ainsi de lire l'indice de rebondissement. En moyennant ces indices et en utilisant une table de référence de l'appareil, on peut connaître la résistance du béton. Les essais de scléromètre (figure III.14) sont effectués sur des éprouvettes cubiques de dimension 20x20x20 cm.



Figure III.14: Essai au scléromètre

III.3.2.4. Essai d'ultrason [NF EN 12504-4]

La méthode de mesure en transparence (directe) conformément à la norme NF EN 12504-4 (figure III.15) consiste à mesurer la vitesse de propagation des ondes ultrasoniques longitudinales entre deux points désignés sur la surface de l'objet testé, en connaissant la distance entre ces deux points. La vitesse de propagation du son en km/s peut être calculée en utilisant la formule suivante:

$$V = L/t \quad (\text{km/s})$$

V: représente la vitesse de propagation,

L: est la longueur de parcours en mm,

T : est le temps nécessaire à l'impulsion pour parcourir cette distance en μs .



Figure III.15: Essai d'ultrason

III.3.2.5. Essai d'absorption par immersion [norme NF P 18-555]

L'absorption par immersion consiste à mettre les éprouvettes prismatiques dans l'étuve à 105°C jusqu'à une masse constante, ensuite les immerger totalement dans l'eau à 20°C pendant une durée de 24 heures c'est-à-dire jusqu'à saturation du matériau, puis les retirer et peser (figure III.16). Le coefficient d'absorption par immersion (A_b) est le résultat de la moyenne des valeurs d'essai réalisé sur plusieurs éprouvettes d'un même échantillon, donné par la formule suivante:

$$A_b \% = \frac{(M_h - M_s)}{M_s} \times 100$$

Avec :

M_h : Masse de l'éprouvette humide

M_s : Masse de l'éprouvette sèche

A_b : coefficient d'absorption d'eau par immersion



Figure III. 16: Essai d'absorption par immersion

III.3.2.6. Essai d'absorption capillaire [NF EN 480-5]

Le coefficient de capillarité (exprimé en $g/(m^2.s^{1/2})$) reflète la capacité d'absorption d'eau d'une pierre lorsque seule une de ses faces est en contact avec l'eau. Pour le déterminer, les éprouvettes sont préalablement séchées à 105°C pour obtenir leur masse sèche, puis mises en contact avec une épaisseur d'eau de 3 mm sur l'une de leurs faces (figure III.17). L'évolution de la masse est ensuite enregistrée à des intervalles réguliers et tracée sur un graphique en fonction de \sqrt{t} . Le coefficient de capillarité (C) est obtenu en calculant la pente de la droite de régression correspondant à la première phase d'absorption, selon la formule suivante:

$$C = (m_i - m_d) \times 100 / (A \times \sqrt{t})$$

avec :

m_i : la masse au temps i ,

m_d : la masse sèche,

A : la surface en contact avec l'eau.



Figure III. 17: Essai d'absorption capillaire

III.3.2.7. Essai pénétration de chlorures (NF EN 12390-11)

Un béton est d'autant plus durable qu'il résiste à la pénétration des agents agressifs et les conditions climatiques ou environnementales. Parmi les paramètres qui agissent sur la durabilité, il y a la perméabilité aux chlorures.

Les éprouvettes sont démoulées et conservées dans l'eau à 20°C pendant 28 jours, à l'issue de laquelle elles sont immergées dans une solution de NaCl concentrée à 5%. Après immersion dans la solution NaCl, la résistance à la pénétration des chlorures est déterminée selon les normes NF EN 12390-11 aux âges 90 et 120 jours. La solution d'essai NaCl a été changée tous les 28 jours jusqu'à une période d'immersion de 120 jours.

Au moment de l'essai, l'éprouvette sera coupée en deux afin d'obtenir des mini-prismes. Puis on verse sur chaque section coupée une solution de nitrate d'argent $AgNO_3$ (figure III.18) en attendant leur absorption par ces derniers. Le bord de chaque section change de couleur, on obtient une couleur blanche qui représente la profondeur de pénétration des chlorures. On mesure l'épaisseur de la partie colorée à l'aide d'un pied à coulisse sur plusieurs positions. La profondeur de pénétration (X) est la moyenne de toutes les lectures.



Figure III.18: Essai pénétration des chlorures

III.3.2.8. Essai des attaques chimiques [ASTM C267-17]

En vue d'améliorer la durabilité des bétons, on a évalué l'influence du cendre sur les caractéristiques de ces derniers vis-à-vis des milieux agressifs tels que les acides et les bases. Les bétons ont été coulés dans des moules cubiques 7x7x7cm. Après 24 heures, les éprouvettes ont été démoulées et conservées dans l'eau à une température de 20°C et une humidité relative de 95 % pendant 28 jours.

Après 28 jours de cure sous l'eau, les éprouvettes sont pesées pour déterminer M_1 , puis elles sont immergées dans les différentes solutions citées ci-dessous et renouvelées chaque 14 jours (selon la valeur du PH):

- 4% d'acide chlorhydrique (HCL) acide fort (figure III.19),
- 4% d'acide sulfurique (H_2SO_4) acide fort (figure III.20),
- 4% d'acide acétique (CH_3COOH) acide faible (figure III.21),
- 4% d'hydroxyde de potassium (KOH) solution basique (figure III.22).

La résistance due aux agressions chimiques des échantillons immergés dans ces solutions, est évaluée par leur perte de masse selon la norme ASTM C 267-96, les éprouvettes sont nettoyées avec l'eau puis laissées sécher à la température ambiante pendant 30 minutes. Ensuite, on procède à la pesée de ces dernières d'où la masse M_2 . Les mesures sont effectuée après 1, 7, 14, 21, 28, 56, 90 jours après l'immersion.

La résistance chimique est évaluée par la mesure de la variation de masse de l'éprouvette:

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

Avec :

M_1 : masse de l'éprouvette avant l'immersion

M_2 : masse de l'éprouvette après l'immersion.



Figure III.19: Eprouvettes immergées dans une solution de 4% d'HCL



Figure III.20: Echantillons immergés dans une solution de 4% de H₂SO₄



Figure III.21: Echantillons immergés dans une solution de 4 % d' CH₃COOH



Figure III.22: Echantillons immergés dans une solution de 4% de KOH

III.3.2.9. Diffraction des rayons X (DRX)

C'est une technique de caractérisation des matériaux qui utilise des rayons X pour déterminer leur structure cristalline. Les rayons X sont dirigés sur l'échantillon, qui diffracte les rayons dans différentes directions en fonction de sa structure cristalline. En mesurant l'angle de diffraction des rayons X, on peut déterminer la disposition des atomes dans l'échantillon et ainsi obtenir des informations sur sa structure cristalline. La détermination des phases amorphe et cristalline par diffraction des rayons X a été réalisée par un diffractomètre XRD (Philips, X'Pert), utilisant un rayonnement $\text{Cu K}\alpha$ à 40 kV, 35 mA avec une largeur de pas de $0,02^\circ$ allant de 10° à 80° (figure III.23). Les cartes ICDD ont été utilisées pour identifier l'intensité et la position des pics.



Figure III.23: Diffractomètre DRX (Philips, X'Pert)

III.3.2.10. Spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR)

C'est une technique analytique de spectroscopie infrarouge qui permet d'identifier les composés chimiques dans un échantillon. Elle est basée sur l'interaction entre la lumière infrarouge et les liaisons chimiques des molécules. L'échantillon est exposé à une source de rayonnement infrarouge (figure III.24) et la quantité de lumière absorbée est mesurée en fonction de la fréquence des vibrations des liaisons chimiques présentes dans l'échantillon. Le modèle utilisé est SHIMADZU ; appareil dans la plage d'absorption de 400 cm^{-1} à 1500 cm^{-1} .



Figure III.24: Spectrophotomètre infrarouge à transformée de Fourier

III.3.2.11. Microscope électronique à balayage (MEB)

C'est un instrument d'imagerie utilisé pour visualiser des échantillons à très haute résolution. Le MEB (figure III.25) utilise un faisceau d'électrons balayé sur la surface de l'échantillon, et les électrons qui rebondissent sont détectés pour créer une image en trois dimensions de l'échantillon. Cette technique permet d'obtenir des images avec une résolution allant jusqu'à quelques nanomètres, ce qui permet d'observer des détails très fins de la surface de l'échantillon. Le MEB utilisé est de type (Tescan Vega3) .



Figure III.25: Microscope électronique à balayage

III.4. Conclusion

Ce chapitre traite successivement les éléments suivants:

- *Présentation des programmes expérimentaux utilisés dans cette étude,
- *Fourniture des compositions des mélanges de béton,
- *Présentation des résultats des formulations pour chaque composition,
- *Regroupement de tous les essais réalisés sur le béton,
- *Description des méthodes d'essais, du processus de fabrication et de conservation des éprouvettes.

Chapitre IV

Influence des cendres de bois sur les propriétés du béton auto-plaçant

IV. Influence des cendres de bois sur les propriétés du béton auto-plaçant

IV.1. Introduction

Dans ce chapitre on va analyser l'ensemble des résultats trouvés à l'état frais (densité, étalement, L-BOX, stabilité au tamis, V-funnel et air content) ainsi que les propriétés à l'état durci à savoir la résistance en compression et en traction par flexion, la résistance obtenue par scléromètre, les vitesses ultrasonique, module d'élasticité et l'analyse par DRX et FTIR.

IV.2. Influence du taux de substitution des cendres de bois sur les propriétés à l'état frais

IV.2.1. Etalement

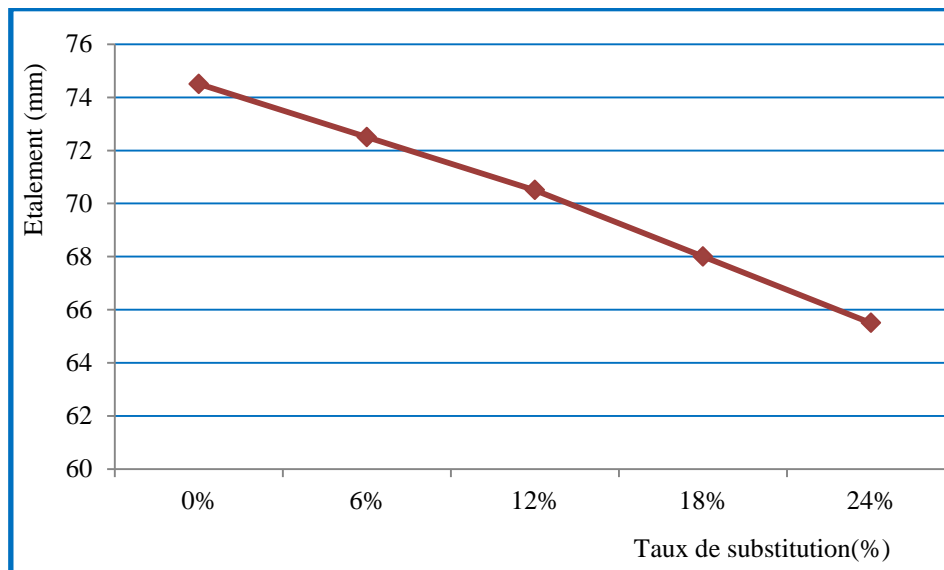


Figure IV.1: Variation de l'étalement en fonction du taux de substitution

La figure IV.1 montre que le remplacement partiel des fines calcaires par les cendres de bois engendre une diminution de la consistance et la cohésion des mélanges en fonction de l'augmentation du taux de substitution mais le diamètre de l'étalement reste dans les normes. Cette diminution peut être due à la demande en eau plus élevée des cendres de bois en raison de la texture et la forme irrégulière des particules et sa porosité (Usman et al. (2018)) et à la teneur en matière organique (Wang et al. (2008)).

IV.2.2. Aptitude à l'écoulement (L –Box)

La vérification de la mise en place du BAP par la mobilité en milieu confiné (figure IV.2), et son aptitude à traverser une zone fortement armée montre que la capacité de remplissage augmente avec l'augmentation du pourcentage des cendres jusqu'à un taux de 18% où le risque de ségrégation est minimale, au de là de ce taux la capacité de remplissage diminue pour atteindre une valeur de 0.88 à un taux de 24% (valeur supérieur du BAP de référence).

On peut dire que les cendres de bois améliorent l'écoulement du BAP en milieu confiné, et la valeur optimale est enregistrée pour un taux de 18%. Ces résultats ne concordent pas avec ceux trouvés par Usman et al. (2018).

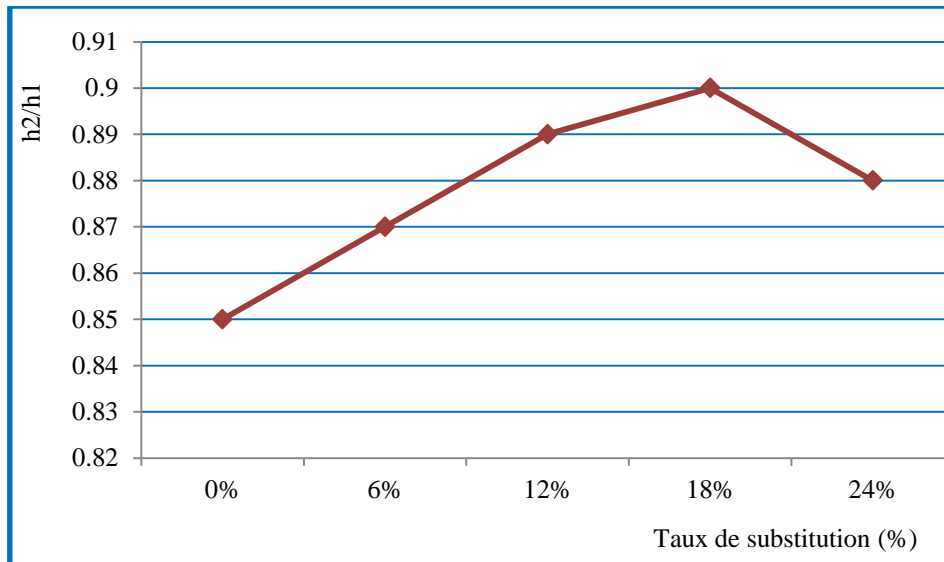


Figure IV.2: Influence du taux de substitution sur capacité de remplissage

IV.2.3. Résistance à la ségrégation statique (stabilité au tamis)

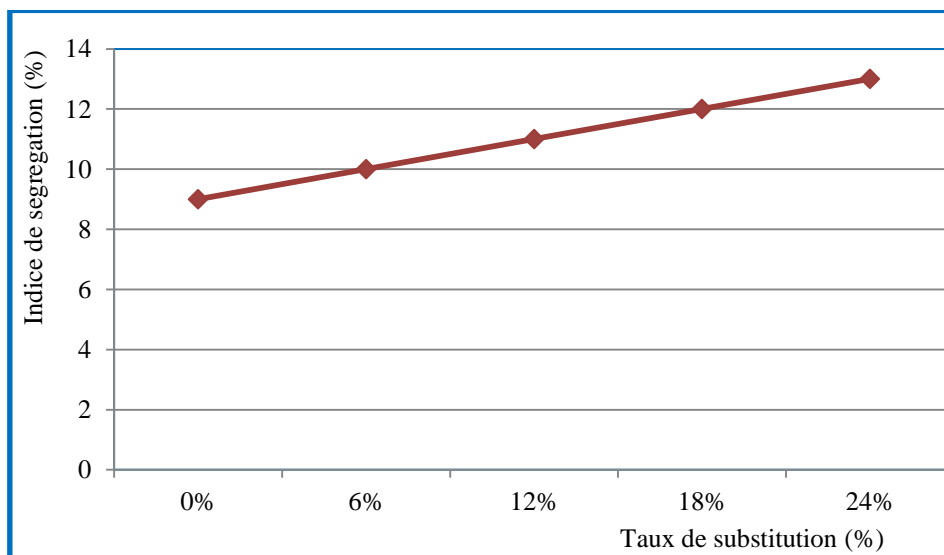


Figure IV.3: Influence du taux de substitution sur l'indice de ségrégation

L'indice de ségrégation (figure IV.3) croît par une variation insignifiante avec l'importance du taux de cendres de bois mais reste inférieur à 15% (valeur préconisée par la norme), ce qui traduit par une stabilité satisfaisante et risque de ségrégation statique faible. L'ajout des cendres de bois en substitution partielle des fines calcaire a conservé une composition homogène sous l'effet de la gravité.

IV.2.4. Temps d'écoulement à l'entonnoir « V-funnel » (viscosité apparente)

Sur la figure IV.4 on présente la variation de l'écoulement des bétons auto-plaçant en fonction du taux de substitution.

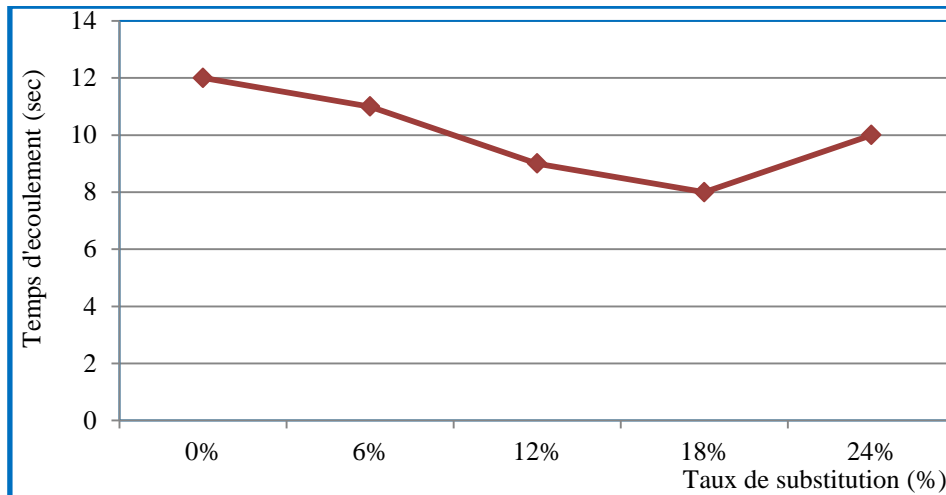


Figure IV.4: Influence du taux de substitution sur le temps d'écoulement

L'introduction des cendres de bois dans la formulation du BAP engendre une diminution du temps d'écoulement en comparaison avec le BAP témoins pour atteindre une valeur de 8 secondes d'où une viscosité apparente minimale ce qui traduit par une bonne ouvrabilité. Ces résultats sont expliqués par l'effet fluidifiant des cendres de bois, cependant, cette caractéristique est perdue pour des valeurs de substitution élevées car la demande en eau sera plus élevée et générera une plus grande friction entre les particules ce qui explique l'augmentation du temps d'écoulement à un taux de 24% qui reste inférieure à celle du BAP témoins.

IV.2.5. Densité

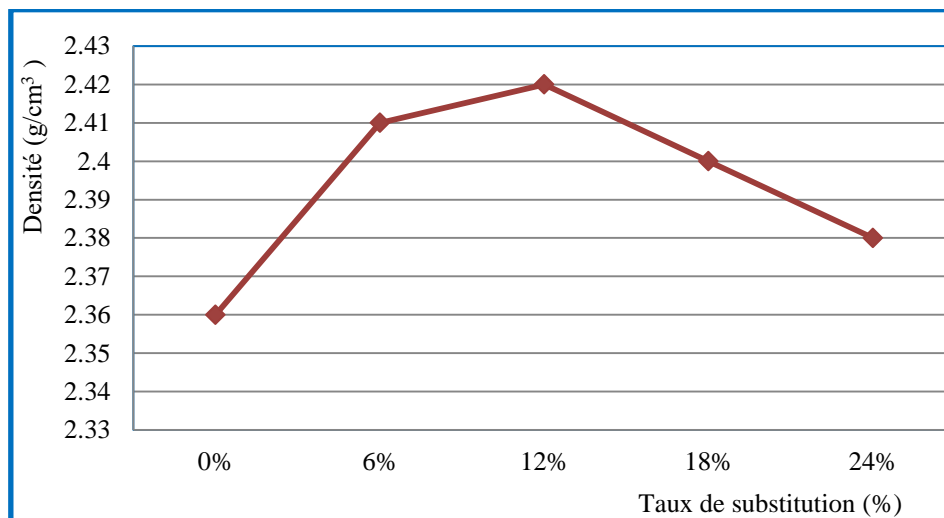


Figure IV.5: Influence du taux de substitution sur la densité

L'ajout des cendres de bois dans la formulation du BAP (figure IV.5) entraîne une augmentation de la densité jusqu'à un taux de 12%, au-delà de ce taux l'effet s'inverse. La forme angulaire des cendres de bois entraîne un arrangement dans la structure interne du BAP et joue le rôle de remplissage ce qui explique l'augmentation de la densité (0 à 12%) par contre pour un taux plus important (24%) la porosité élevée et la faible densité des cendres rend le béton plus léger mais plus dense que le BAP témoins (Remdan et al. (2022)).

IV.2.6. Air occlus

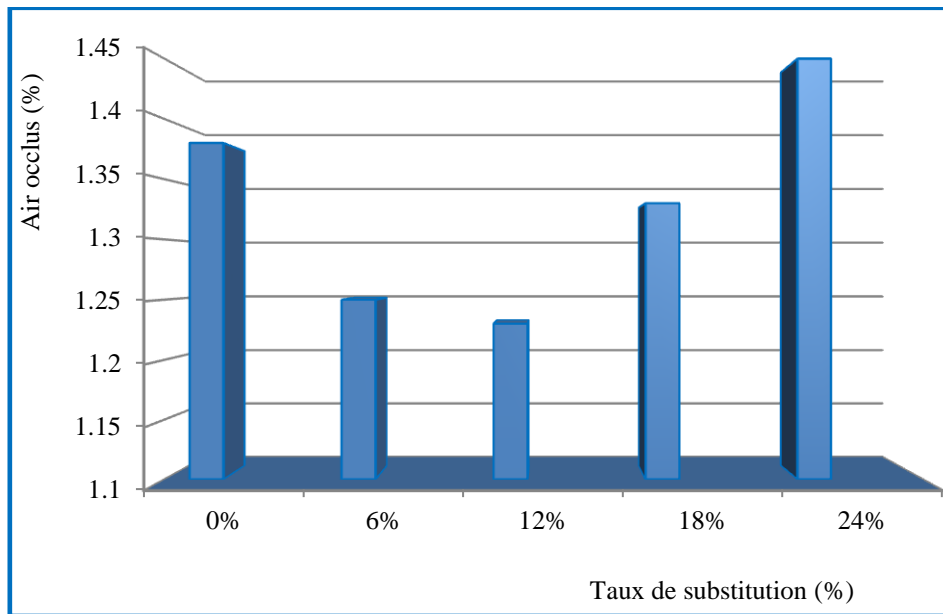


Figure IV.6: Influence du taux de substitution sur la teneur de l'air occlus

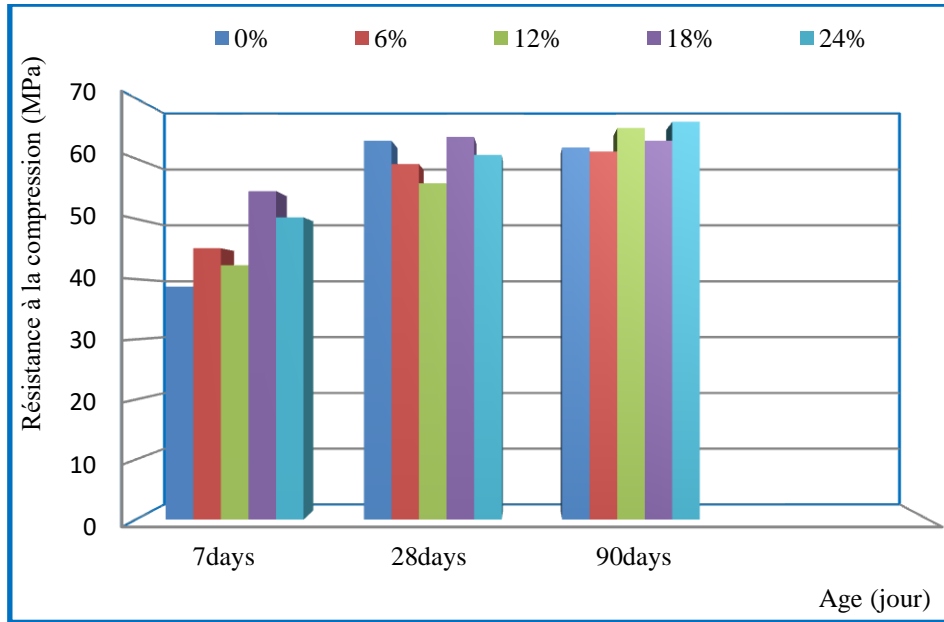
La teneur en air occlus (figure IV.6) diminue avec l'ajout des cendres de bois pour atteindre une valeur minimale à 12% de taux de substitution, cette diminution peut être due à la forme angulaire des cendres de bois qui entraîne un arrangement dans la structure interne du BAP et rend sa compacité maximale à ce taux. Au-delà de 12% de taux de substitution la teneur en air occlus augmente pour marquer une valeur maximale à 24%, ce phénomène peut s'expliquer par la porosité et la morphologie irrégulière des particules de cendres de bois (Remdan et al.(2022), Chowdhury et al. (2015))

IV.3. Influence du taux de substitution des cendres de bois sur les propriétés à l'état durci

IV.3.1. Résistance à la compression

La figure IV.7 montre que les mélanges à base de cendres de bois enregistrent des résistances en compression au jeune âge (7 jours) plus élevées en comparaison avec le BAP de référence. Ces résultats peuvent être dus au taux d'hydratation accéléré du C3S en présence d'un hydrate de carbo-silicate de calcium, qui peut également contribuer au remplissage des vides (figure IV.8) lors de l'ajout de cendre de bois (Sua-Iam et Makul (2013)).

Après 28 jours de durcissement, tous les mélanges présentent une amélioration de la résistance à la compression et la résistance maximale est donnée par le BAP de 18% de taux de substitution. A long terme (90 jours), les BAP à base de cendres de bois ont donné les meilleures résistances en compression en comparaison avec le BAP de référence, ces résultats sont expliqués par la présence de la Portlandite qui accélère la formation du gel C-S-H par une réaction d'hydratation secondaire ((Cheah et al. (2017) Horsakulthai et al. (2011)) (résultats confirmés par le DRX).



FigureIV.7:Influence du taux de substitution sur la résistance en compression

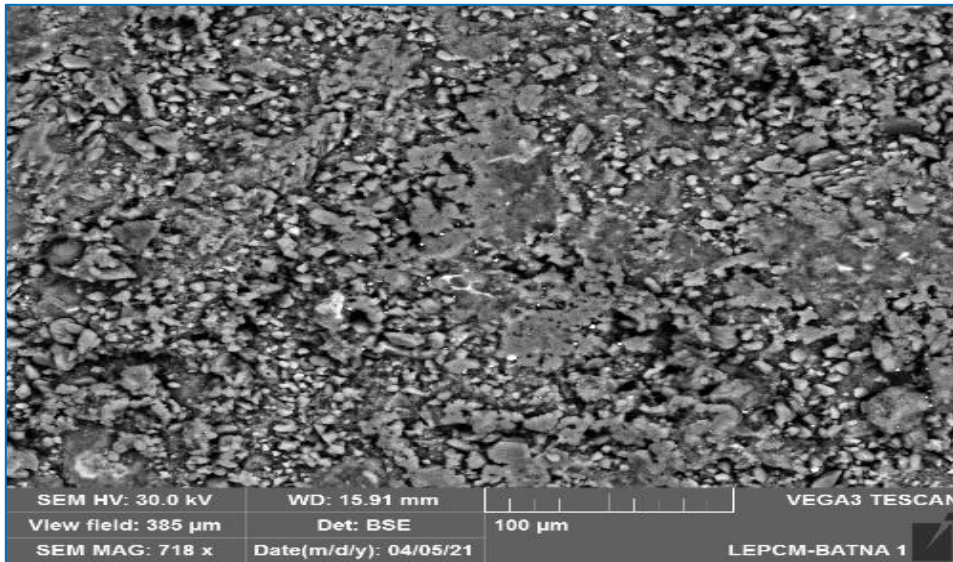


Figure IV.8: MEB D'un BAP de 18% de cendre de bois

IV.3.2. Résistance en traction par flexion

Le comportement en traction par flexion est le même qu'en compression au jeune âge, l'addition des cendres de bois (figure IV.9) engendre une augmentation des résistances en traction par flexion qui restent acceptable a 28jours. A long terme (90jours), les particules des cendres de bois de plus petite taille comblaient efficacement les espaces entre la fraction plus grossière des particules des granulats ainsi que les particules de ciment ce qui explique les meilleurs résistances de 18 et 24%. De plus, la rugosité de surface des grains des cendres de bois a fait un bon emboîtement avec la pâte de ciment, conduisant à une meilleure zone de transition inter faciale entre le granulat et la matrice de la pâte et ainsi amélioré la résistance à la traction. Ces résultats sont cohérents avec ceux trouvé par Naik et al. (2002).

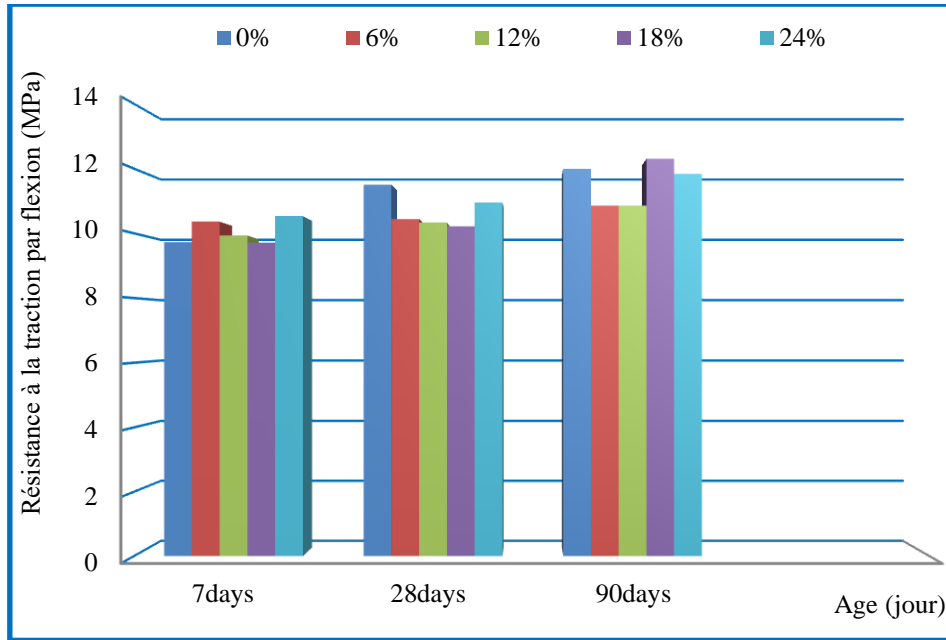


Figure IV.9: Influence du taux de substitution sur la résistance en traction par flexion

IV.3.3. Résistance en compression obtenue par l'essai scléromètre

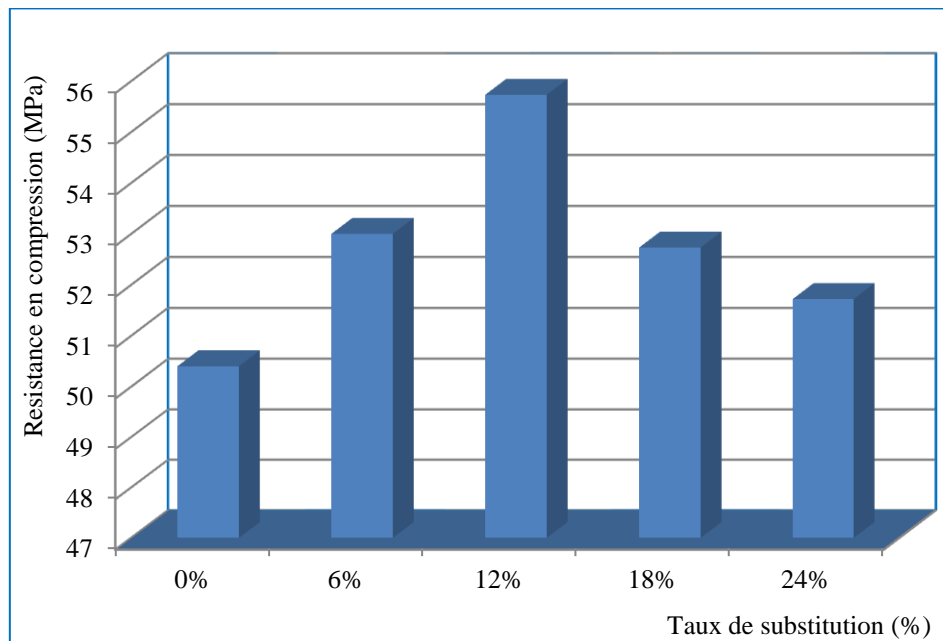


Figure IV.10: Influence du taux de substitution sur la résistance en compression obtenue par l'essai scléromètre

Les BAP contenant des cendres de bois (figure IV.10) présentent des résistances et des duretés à la surface supérieure à seul du BAP témoins, ceci est dû principalement à l'augmentation de la densité par l'ajout des cendres et à la morphologie des grains qui offrent une meilleure adhérence à la pâte (Usman et al. (2018)). La valeur minimale de la résistance en compression est de 50.40MPa obtenue dans le BAP témoins.

IV.3.4. Vitesse de propagation du sonobtenue par ultrason

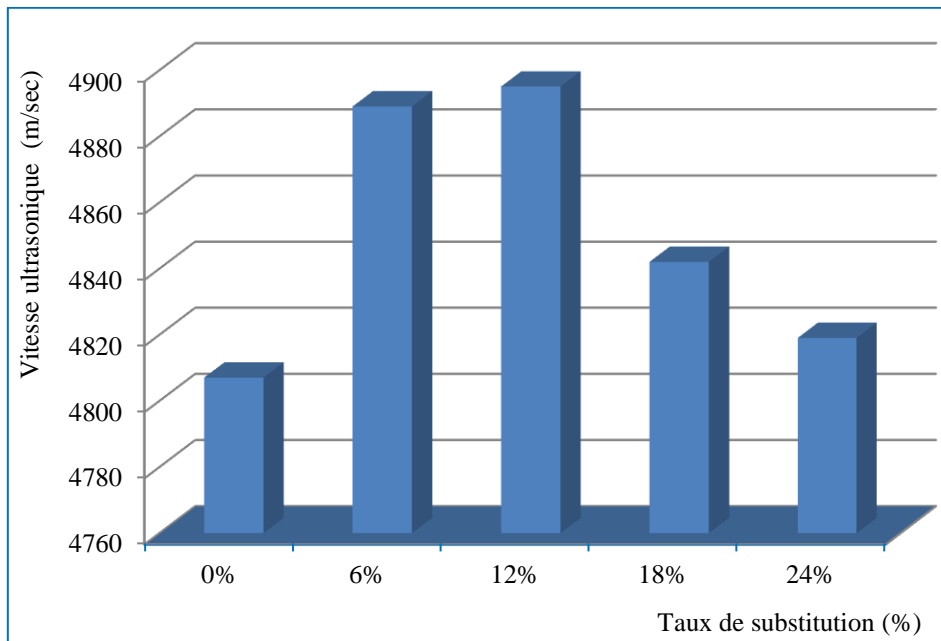


Figure IV.11: Variation de la vitesse ultrasonique en fonction du taux de substitution

Le remplacement partiel des fines calcaires par des cendres de bois dans la formulation du BAP (figure IV.11) influe significativement sur l'homogénéité des BAP. Les BAP à base des cendres de bois présentent des vitesses supérieures à 4200m/s qui permet de classer ces bétons comme des BAP à très haute résistance (Neville (1996), Salam et al. (2015), KaKali (2000)).

La vitesse de propagation du son à travers les BAP à base de 6 et 12% de taux de substitution de cendre de bois respectivement (4889 et 4895m/s) sont plus rapide, en comparaison avec le BAP témoin (4807m/s), soit une augmentation de 1.70% à 1.83%. Le passage rapide est justifié par l'augmentation de la densité des mélanges à base de cendres de bois (Boughamsa et al. (2020)) ce qui signifie que les BAP à base de 6 et 12 % de cendres de bois sont plus homogène que le BAP sans cendres.

IV.3.5. Résistance à la compression obtenue par la méthode combinée ultrason/scléromètre

Les résultats obtenues par la méthode combinée des essais non destructifs (figure IV.12), confirme que les BAP a base des cendres de bois donnent les meilleures résistances en compression avec une valeur maximale enregistrée pour un taux de 12%. La substitution partielle des fines calcaires par des cendres de bois rend la structure des BAP plus compacte que le BAP témoins (Salam et al. (2015)).

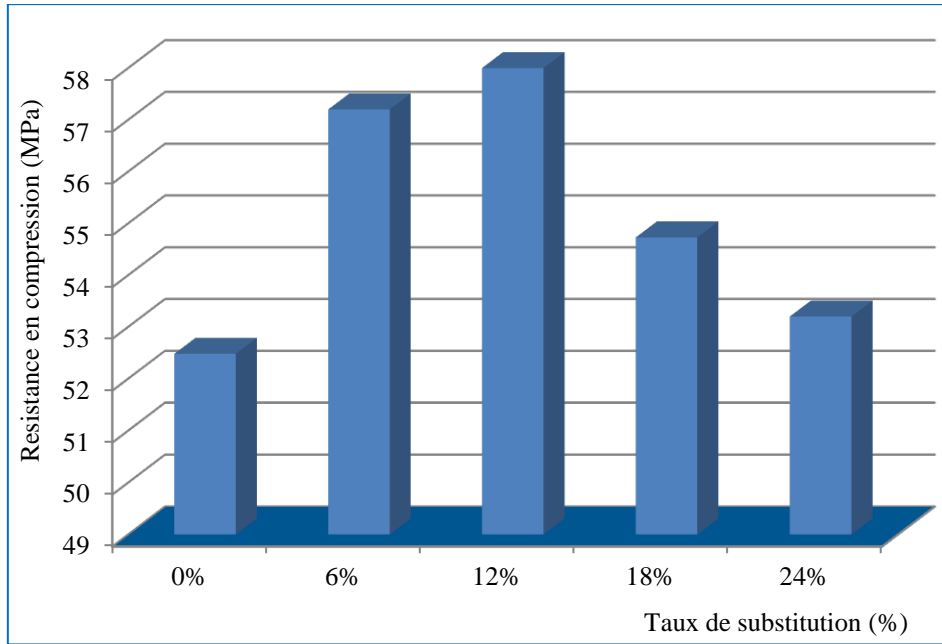


Figure IV. 12: Influence du taux de substitution sur la résistance en compression obtenue par combinaison ultrason/scléromètre

IV.3.6. Module d'élasticité dynamique

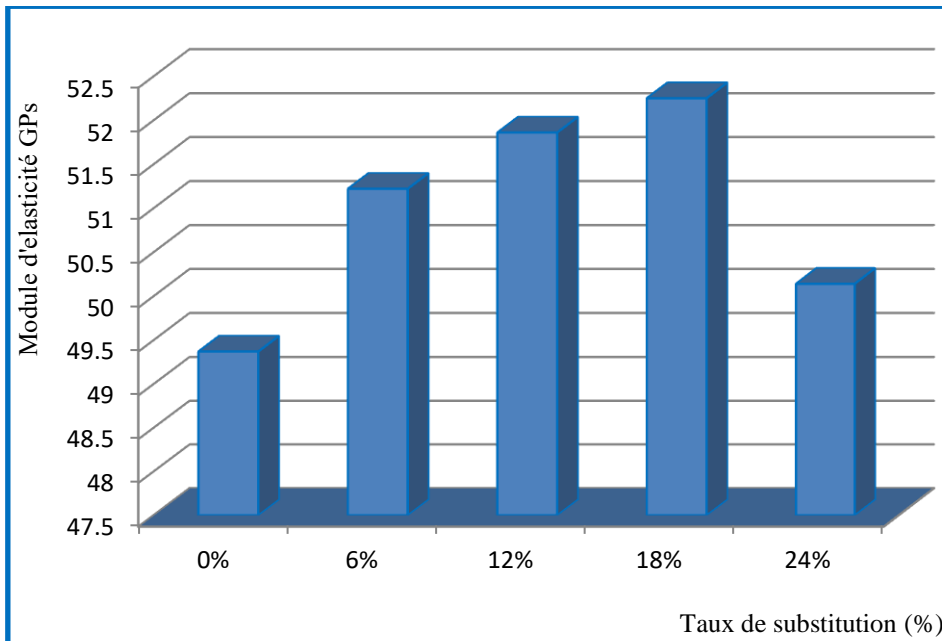


Figure IV.13: Variation du module d'élasticité en fonction du taux de substitution

Le module d'élasticité dynamique (figure IV.13) augmente avec l'augmentation du taux de substitution des fines calcaires par les cendres de bois avec une variation allant de 3.75% à 5.83% pour un taux de 18%. Les cendres de bois ont un effet positif sur le module d'élasticité des bétons qui est dû à l'augmentation de l'adhésivité de la zone de transition interfaciale, pâte de ciment/granulats fins (Cheah 2011).

IV.3.7. Etude structurale par DRX

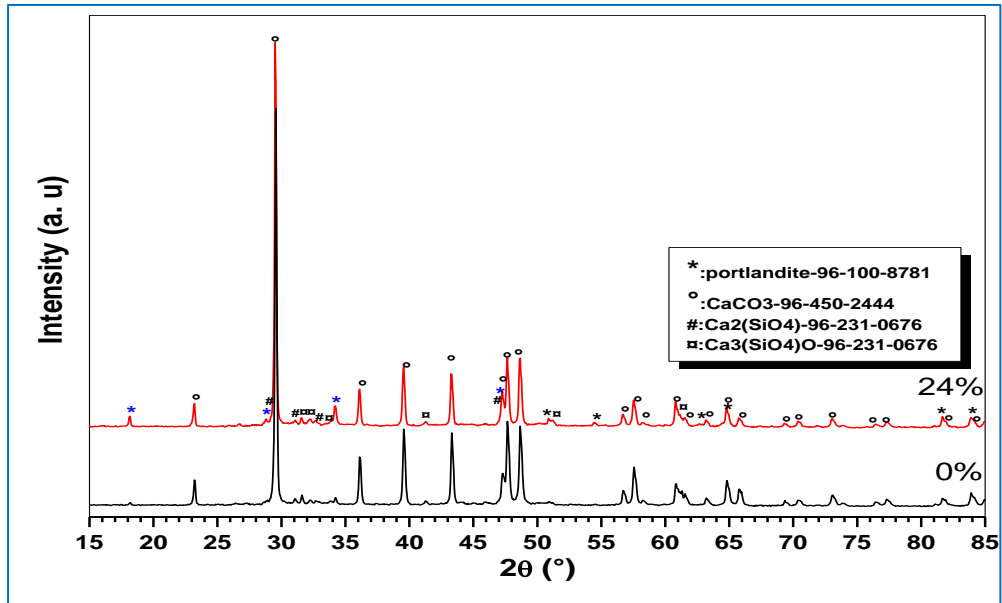


Figure IV.14: Spectres de DRX des BAP à l'état durcis.

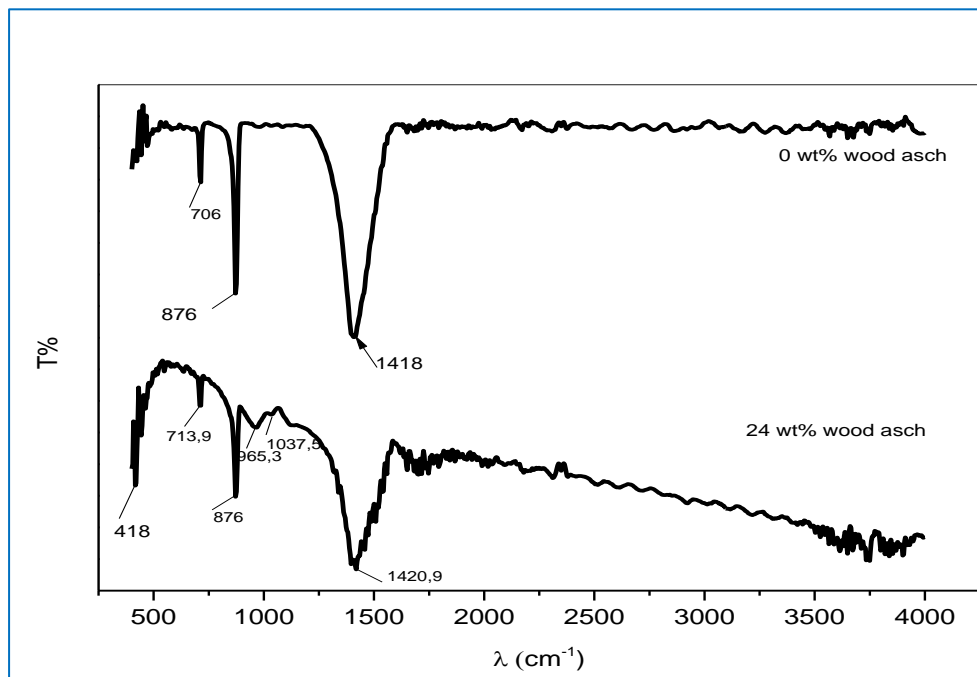


Figure IV.15: FTIR des BAP de 0 et 24% de cendre de bois

D'après la figure (figure IV.14), et la (figure IV.15) Il n'y avait pas de différence majeure dans le schéma DRX des échantillons témoins et avec 24% de cendres de bois. Le carbonate de calcium qui contribue largement dans la résistance est l'élément le prédominant dans les deux échantillons (Usman et al. (2018)). La formation de la Portlandite dans le BAP de 24% de taux de substitutions de cendres de bois indique que ce matériau n'est pas inerte et participe à la réaction chimique elle-même (Usman et al. (2018)). Les résultats de FTIR confirment les résultats des DRX.

IV.4. Conclusion

L'étude de l'influence des cendres de bois sur les propriétés à l'état frais et durci nous permettons de tirer les conclusions suivantes:

-Le remplacement partiel des fines calcaires par des cendres de bois engendre une diminution de la consistance mais reste acceptable, la capacité de remplissage augmente avec l'augmentation du pourcentage des cendres jusqu'à un taux de 18% ou le risque de ségrégation est minimale, une stabilité satisfaisante et risque de ségrégation statique faible.

-L'ajout des cendres de bois dans la formulation du BAP entraîne une diminution du temps d'écoulement pour atteindre une valeur de 8 secondes d'où une viscosité apparente minimale ce qui traduit par une bonne ouvrabilité.

-La densité et la teneur en air occlus diminue avec l'ajout des cendres de bois pour atteindre une valeur minimale à 12% de taux de substitution, cette diminution peut être due à la forme angulaire des cendres de bois qui entraîne un arrangement dans la structure interne du BAP et rend sa compacité maximale à ce taux.

-Les mélanges à base de cendres de bois enregistrent les meilleures résistances en compression au jeune âge et à long terme qui est due à la présence de la Portlandite accélère la formation du gel C-S-H par une réaction d'hydratation secondaire. La meilleure résistance en compression est donnée par le BAP de 18% de taux de substitution à l'âge 28 jours.

-Le comportement en traction par flexion est le même qu'en compression au jeune âge, et la résistance maximale est donnée par le BAP de 18% de taux de substitution à long terme.

-Les BAP contenant des cendres de bois présentent des résistances et des duretés à la surface supérieure à celle du BAP témoins, et influent significativement sur l'homogénéité des BAP.

-Les vitesses ultrasoniques ont montré que les BAP à base de cendres sont des BAP à très haute résistance.

-Les cendres de bois ont un effet positif sur le module d'élasticité des bétons qui est due à l'augmentation de l'adhésivité de la zone de transition interfaciale, pâte de ciment/granulats fins.

-L'analyse par DRX et FTIR indique que ce matériau n'est pas inerte et participe à la réaction chimique d'hydratation.

D'une manière générale le remplacement partiel des fines calcaires par des cendres de bois influence positivement les propriétés des BAP et devient une solution importante à l'avenir qui permet de réduire l'utilisation de ces fines.

Chapitre V

Influence des cendres de bois sur les paramètres de durabilité et microstructural du béton auto- plaçant

V. Influence des cendres de bois sur les paramètres de durabilité et microstructural du béton auto-plaçant

V.1. Introduction

Dans cette partie d'étude on analyse les résultats des essais de durabilité à savoir l'absorption par immersion et capillaire, la pénétration des ions de chlorures et la résistance aux attaques chimiques par les acides et les bases ainsi que la microstructure.

IV.2. Influence du taux de substitution des cendres de bois sur les paramètres de durabilité

V.2.1. Absorption d'eau par immersion

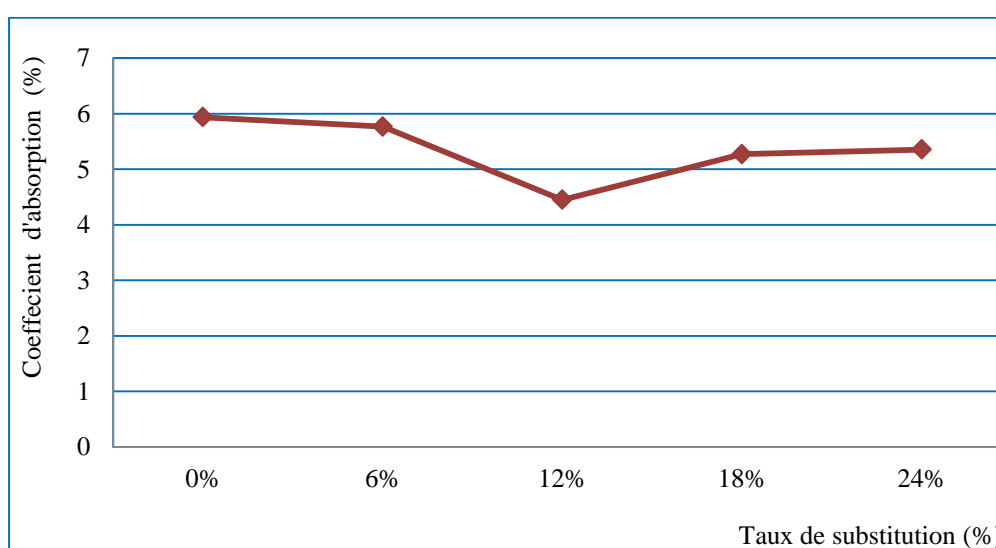


Figure V.1: Variation du coefficient d'absorption d'eau par immersion en fonction du taux de substitution

L'absorption d'eau par immersion (figure V.1) diminue avec l'augmentation du taux de substitution des cendres de bois par rapport au BAP témoins. Cette diminution a une relation avec la diminution de l'air occlus et l'augmentation de la densité. Les particules des cendres de bois ont une forme angulaire qui entraîne un arrangement dans la structure interne du BAP et rend sa compacité maximale (Ramdane et al. (2022)). Ces résultats sont cohérents avec les résultats trouvés par Memon et al. (2017).

V.2.2. Absorption capillaire

L'absorption d'eau par capillarité (figure V.2) augmente avec le temps et le taux de substitution sauf pour le BAP de 12% de taux de substitution qui présente une compacité maximale et une variation comparable à celui du BAP témoin. Les cendres de bois font partie des matériaux hygroscopiques qui donnent au béton une capacité d'absorber plus d'eau par capillarité (Fusade et al. (2019)).

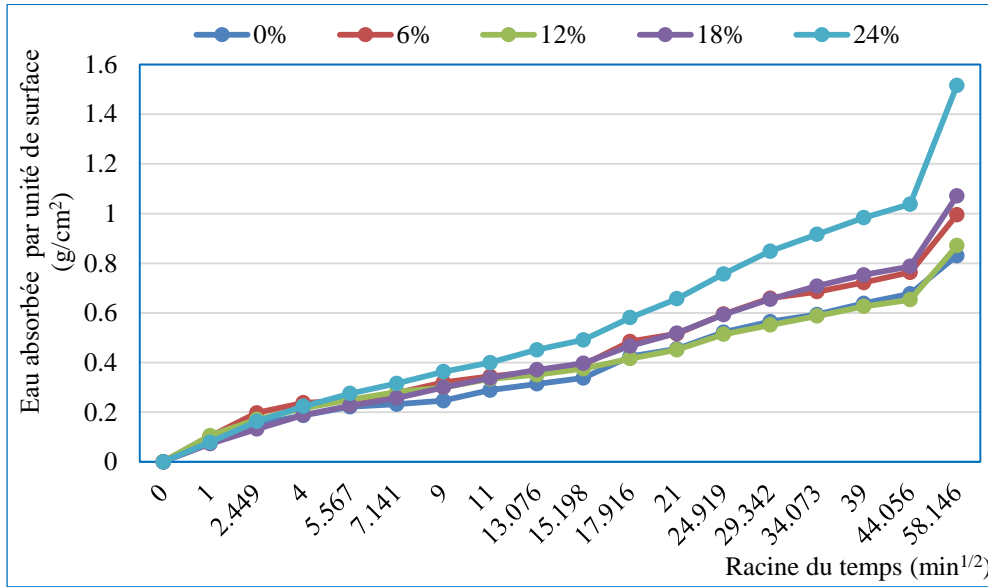


Figure V.2: Variation de l'absorption capillaire en fonction du temps

V.2.3. Pénétrations des chlorures

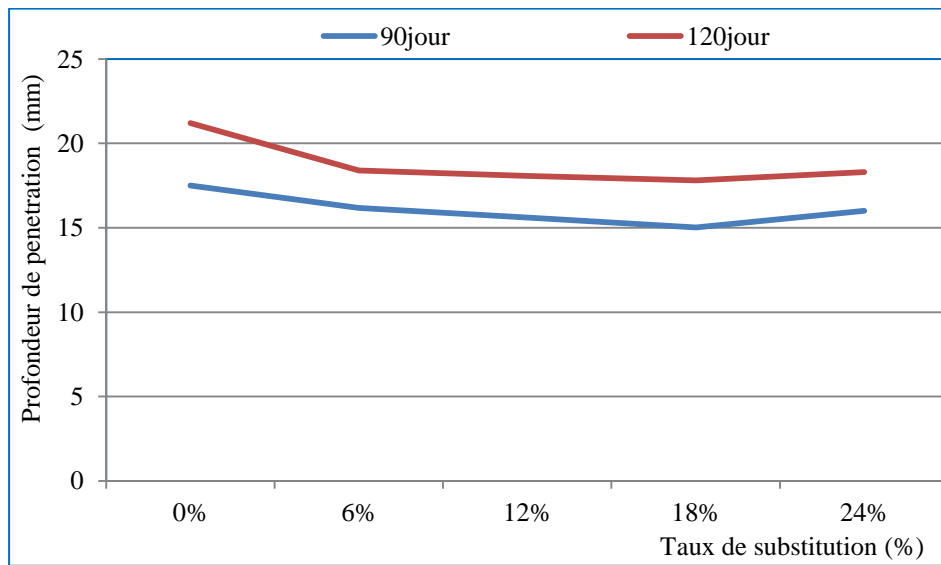


Figure V.3: Variation de la profondeur de la pénétration des chlorures en fonction des taux de substitution

La figure V.3 montre une diminution de la profondeur de pénétration des ions chlorures dans tous les BAPs à base de cendres de bois par rapport au BAP témoins, les mélanges de BAP à 12% et 18% de cendre de bois présentent la meilleure résistance à la solution saline. A 120 jours on trouve la même tendance. La résistance aux ions des chlorures du béton donne une mesure indirecte de sa perméabilité et sa structure poreuse interne (Hasnain et al. (2021)). En effet d'après Omran et al. (2018), à cause de leur faible densité et leur particules très fines, les cendres de bois augmentent le volume de la matrice de liant et affinent le réseau de pores en les remplissant et ainsi rend la microstructure du BAP plus dense et moins perméable

V.2.4. Résistances chimiques aux acides et bases

V.2.4.1. Attaque par acide chlorhydrique HCL

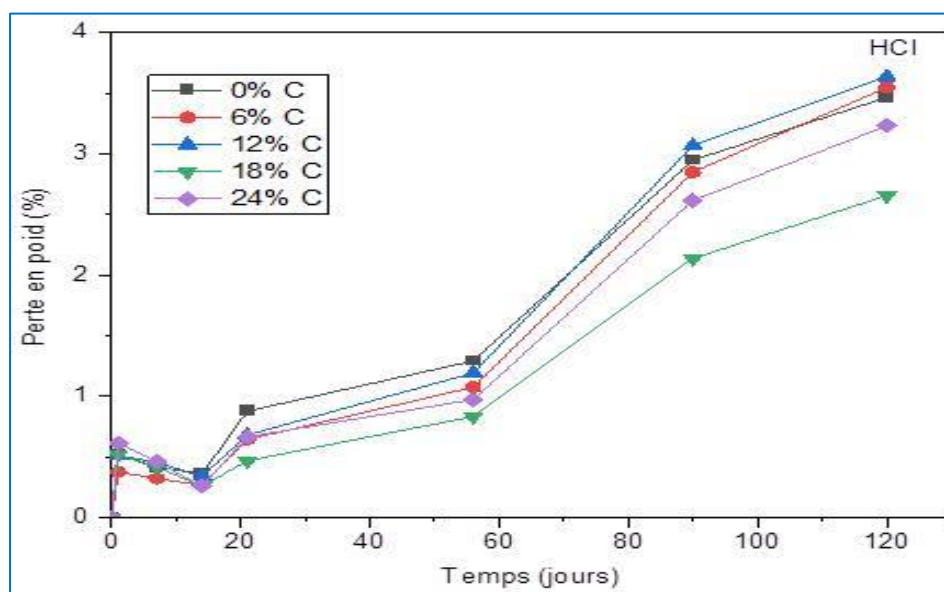
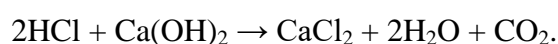


Figure V.4: Variation de la perte en poids en fonction du temps d'immersion dans la solution de 4% de HCL

La variation de perte de poids des échantillons exposés à une solution d'acide chlorhydrique à 4% est représentée dans la figure V.4. On peut dire que la perte en masse diminue à mesure en fonction de l'augmentation du taux de cendre. La réaction de l'acide chlorhydrique avec le ciment entraîne la formation de chlorures de calcium, qui sont des sels très solubles dans l'eau. Cette formation est plus importante en présence de fillers calcaires (Siad et al. (2010)). Lorsque le béton est exposé à l'acide chlorhydrique, une réaction acide-base se produit, qui forme du chlorure de calcium. Cette réaction chimique est donnée par l'équation suivante:



V.2.4.2. Attaque par acide sulfurique H₂SO₄

Les mélanges immergés dans une solution de 4% de H₂SO₄ (acide sulfurique) présentent tous une perte de poids croissante au fil du temps (figure V.5).

Selon (Yuan et al. (2013)); au début, il y a un gain de poids car l'expansion du gypse comble les pores, réduisant ainsi la porosité. À partir de 21 jours, une augmentation de la perte de poids est observée dans les échantillons de béton sans ajouts (BAP0%) et ceux contenant 6% de cendre de bois (BAP6%) par rapport aux autres échantillons. On peut donc dire que les échantillons des BAP contenant de la cendre de bois présentent une moindre dégradation par rapport aux échantillons de BAP témoin.

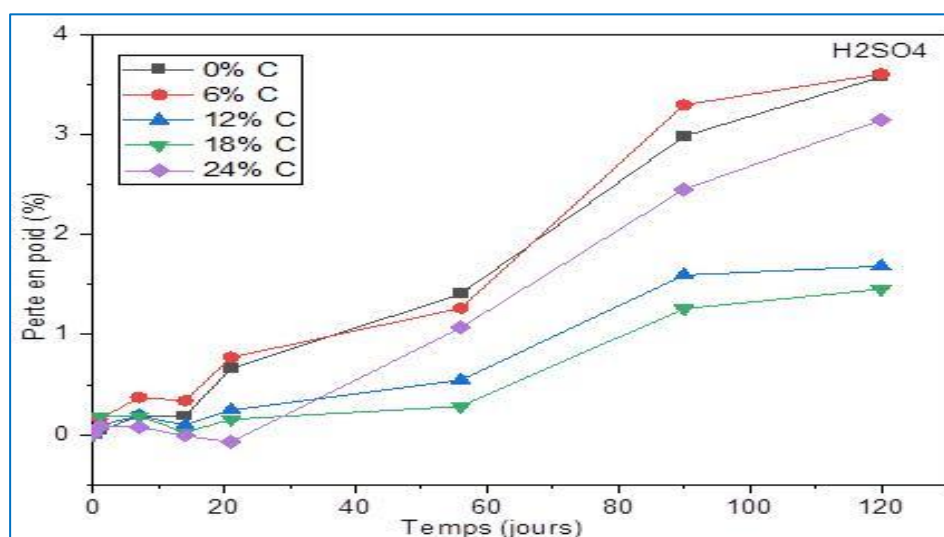
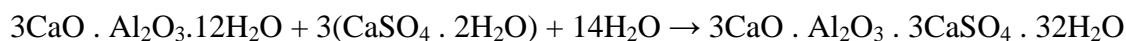
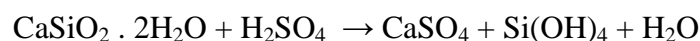
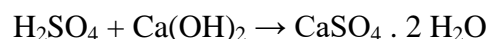


Figure V.5: Variation de la perte en poids en fonction du temps d'immersion dans la solution de 4% de H₂SO₄

La dégradation du BAP par l'acide sulfurique peut se produire en plusieurs étapes, qui dépendent de la concentration de l'acide sulfurique et des propriétés chimiques des composants du béton, qui est caractérisé selon (Monteny et al. (2000)) par les réactions suivantes:



La dégradation du béton peut être causée par la réaction entre l'acide sulfurique et les composants du béton, qui peut se produire en plusieurs étapes. La première étape est la dissolution de la chaux libre dans le béton en présence d'acide sulfurique, qui forme du sulfate de calcium et de l'eau. Ensuite, les ions sulfate libérés réagissent avec le ciment Portland pour former des sulfates de calcium hydratés qui peuvent cristalliser dans les pores du béton, provoquant une expansion et une détérioration de la structure. Enfin, les cristaux de sulfate de calcium hydraté peuvent réagir avec les composants hydratés du ciment pour former de l'ettringite, qui peut provoquer une expansion et une fissuration du béton et une désintégration de la structure, entraînant une perte de résistance et une diminution de la durée de vie du béton.

V.2.4.3. Attaque par l'acide acétique CH₃COOH

Les résultats des essais de l'attaque chimique par la solution de 4% de CH₃COOH des échantillons de BAP sont présentés dans la figure V.6.

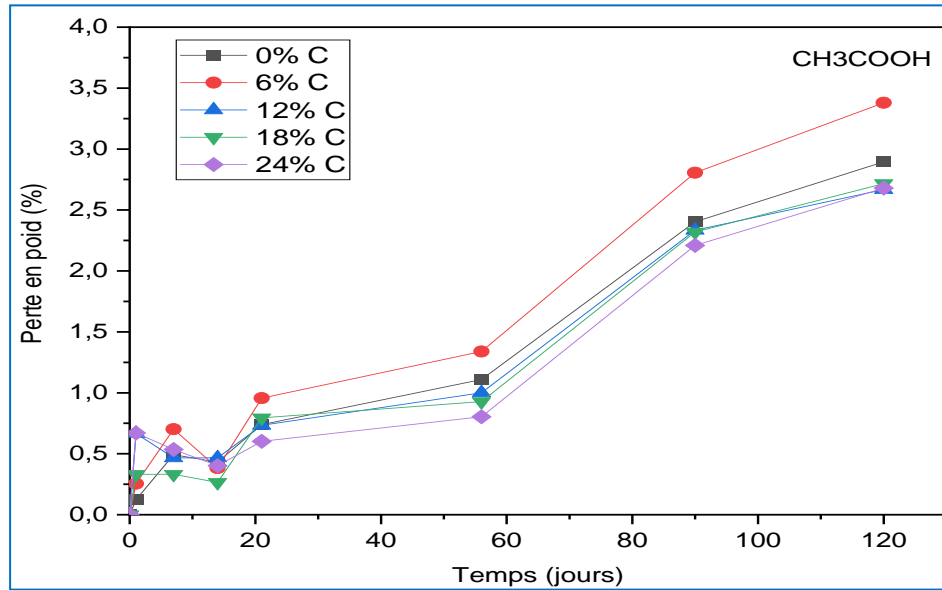
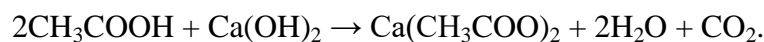


Figure V.6: Variation de la perte en poids en fonction du temps d'immersion dans la solution de 4% de CH₃COOH

Les résultats de l'étude montrent que la perte en poids mesurée sur des échantillons de béton traités avec une solution d'acide acétique CH₃COOH, après 28 jours de maturation dans l'eau. À partir de 21 jours dans l'acide acétique, les échantillons BAP (0%) et BAP (6%) ont présenté les pourcentages de gain en masse les plus élevés, car le BAP contient des fines calcaires très réactives avec les acides, qui dissolvent la pâte de ciment (Kosmatka et al. (2009)). Les échantillons des BAP (12%), BAP (18%) et BAP (24%) contenant des cendres de bois ont présenté une perte en poids inférieures à celui du BAP de référence, d'où des meilleures résistances chimiques. Il est bien connu que l'acide acétique est un composé très agressif pour le béton (Zivica et Bazja (2002)), lorsque l'acide réagit avec les composants alcalins du béton, comme l'hydroxyde de calcium (la Portlandite), il forme de l'acétate de calcium (Ca(CH₃COO)₂); qui est un sel soluble dans l'eau; de l'eau et du dioxyde de carbone (CO₂). L'équation chimique de cette réaction est la suivante:



V.2.4.4. Attaque par l'hydroxyde de potassium KOH

Les résultats relatifs à l'observation des pertes en masses des échantillons immergés dans une solution de KOH ont montré dans la figure V.7.

Les résultats indiquent que l'effet de la réaction alcali-silicate (ASR) est négligeable, avec une variation de masse d'environ 0.2%. Ces résultats sont cohérents avec les études précédentes de Wang et Baxter (2007) et de Ramos et al. (2013), qui ont montré que l'utilisation de cendres de déchets de bois était efficace pour réduire l'expansion due à l'ASR.

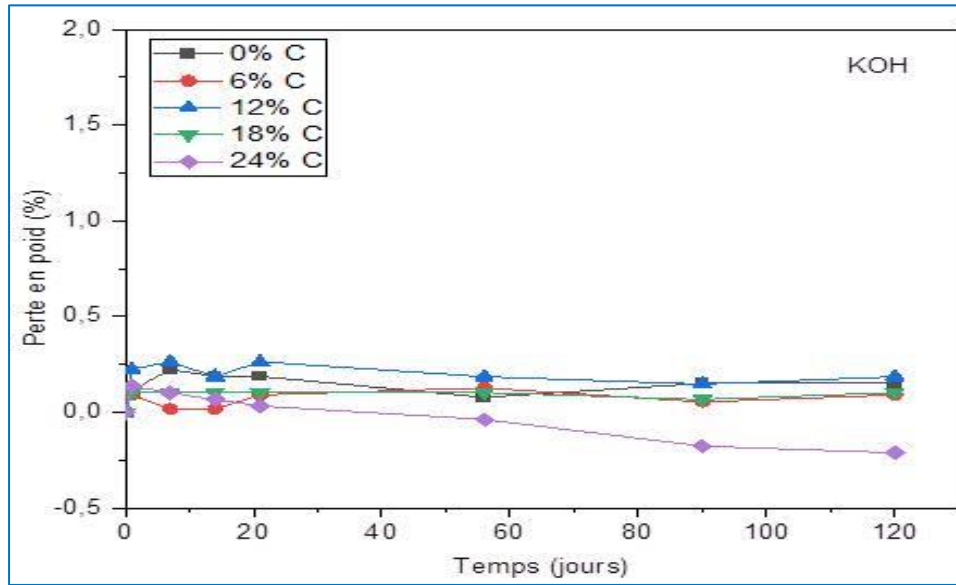


Figure V.7: Variation de la perte en poids en fonction du temps d'immersion dans la solution de 4% de KOH

V.2.4.5. Attaque par NaCl

Les résultats de la figure V.8 présentée démontrent que toutes les formulations de BAP étudiées ont subi un gain de masse ou un perte de masse très modéré il est de l'ordre de 0.5 à 0.6%.

Les échantillons BAP (0%), BAP (6%) et BAP (12%) ont enregistré une perte en poids contrairement aux BAP (18%) et BAP (24%), dans les solutions de chlorure de sodium.

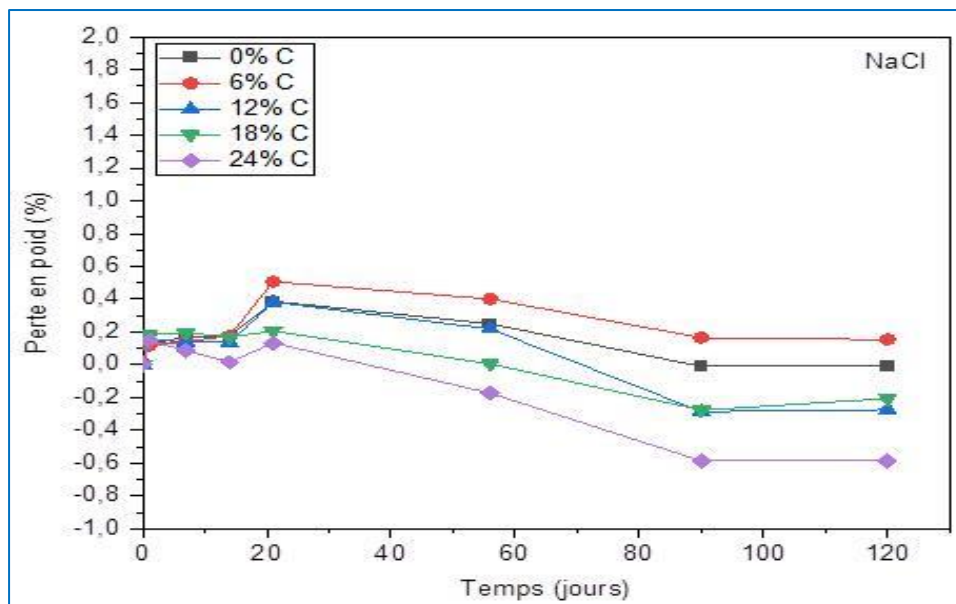


Figure V.8: Variation de la perte en poids en fonction du temps d'immersion dans la solution de 4% de NaCl

Avant que la corrosion des armatures ne se produise dans le béton, il peut y avoir une pénétration du chlorure de sodium (NaCl) à travers les pores du béton. Le chlorure de sodium peut provenir de sources telles que l'eau de mer, les sels de déglacage utilisés sur les routes en hiver, ou encore les eaux usées contenant des sels. Lorsque le chlorure de sodium pénètre dans le béton, il peut dissoudre certains des composants du ciment et des autres minéraux présents dans le béton, créant ainsi des vides ou des espaces poreux. Ce processus est appelé dissolution. La dissolution peut affaiblir la structure du béton et augmenter sa perméabilité, ce qui peut permettre à d'autres substances de pénétrer plus facilement dans le béton.

Pénétration du NaCl: pas d'équation chimique spécifique, c'est une simple diffusion de NaCl dans les pores du béton.

Dissolution du ciment:
$$\text{Ca}_3\text{Si}_2\text{O}_7 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O} + \text{Ca}(\text{OH})_2$$

Formation d'ions chlorure:
$$\text{Ca}^{2+} + 2\text{Cl}^- \rightarrow \text{CaCl}_2$$

Pénétration des chlorures: pas d'équation chimique spécifique, c'est une simple diffusion des ions chlorure à travers le béton.

Corrosion des armatures:

$$\text{Fe} + 2\text{H}^+ + 2\text{Cl}^- \rightarrow \text{FeCl}_2 + \text{H}_2\uparrow ; 4\text{FeCl}_2 + \text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 4\text{Fe}(\text{OH})_2 + 8\text{Cl}^-$$

Expansion et fissuration: pas d'équation chimique spécifique, c'est une conséquence de la formation de rouille sur les armatures et de l'augmentation de volume qui en résulte.

V.3. Etude de la microstructure des bétons exposés aux attaques chimiques

V.3.1. Analyse des spectres FTIR des BAP exposés aux attaques chimiques

La technique FTIR est une méthode plus efficace et plus abordable pour ce type d'études, offrant à la fois la rapidité et la précision. Elle permet d'analyser un grand nombre d'échantillons prélevés sur une structure endommagée. Par conséquent, de nombreux chercheurs ont utilisés le FTIR pour caractériser le béton, en particulier pour étudier sa dégradation sous attaque chimique.

D'après Cheah et al. (2017), Trezza et Lavat. (2001), Kavyateja et al. (2020), Nasrazadan et al. (2016), les bandes vibratoires généralement identifiées pour le béton comprennent les vibrations suivantes:

-Vibrations d'étirement et de flexion des silicates de O-Si-O à 1015 et entre 400 et 800 cm^{-1} , respectivement.

-Vibrations d'étirement, intenses dans la plage de 1200 à 1100 cm^{-1} dues aux liaisons S-O des ions $(\text{SO}_4)^{2-}$ et des bandes plus faible entre 600 et 660 cm^{-1} due aux vibrations de flexion des ions $(\text{SO}_4)^{2-}$.

-Bande dans la plage de 3500 à 3400 cm^{-1} et 1685 à 1600 cm^{-1} dues à la présence de $(\text{Ca}(\text{OH})_2, \text{OH})$.

-Bande due aux vibrations d'étirement Ca-O du CaCO_3 , apparaissant dans la plage de 2550 à 2500 cm^{-1} .

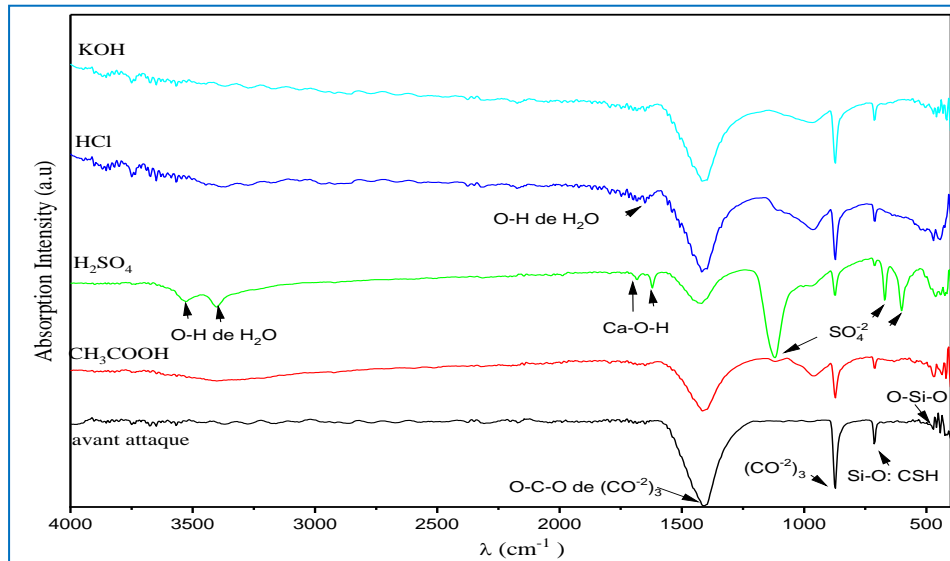


Figure V.9: Courbe d'absorption de la spectroscopie FTIR de BAP0% attaqué par les différentes solutions

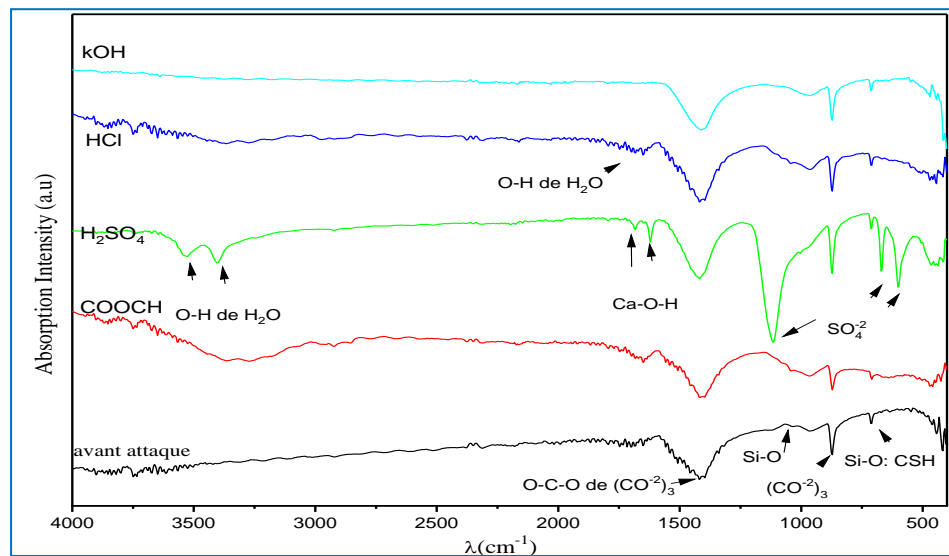


Figure V.10: Courbe d'absorption de la spectroscopie FTIR de BAP 24% attaqué par les différentes solutions

Les spectres FTIR des BAPs attaqués sous différentes solutions (KOH, HCl, CH_3COOH et H_2SO_4) sont présentés dans les figures V.9 et V.10. Les principales bandes associées au BAP témoin attaqué sont situées à 467, 601, 664, 710, 873, 1125, 1426 cm^{-1} et ceux correspondant au BAP24 attaqué sont 460, 601, 664, 712, 873, 1035, 1118, 1406 cm^{-1} .

D'après les figures V.9 et V.10, on remarque qu'après attaque chimique, les bandes FTIR des différents BAP présentent les même pics correspondant aux BAP non attaqués, à l'exception des échantillons mis en contacts avec la solution d'acide sulfurique sulfurique, ou de nouvelles bandes apparaissent.

Les premières bandes à faibles intensités, visibles à 460 et 712 cm^{-1} sont associées à la vibration de flexion des liaisons Si-O-Si et O-Si-O. Elles suggèrent la présence de faible proportion de structures de silicate (Si-O-Si). Une autre bande caractéristique de la liaison Si-O à 1035 cm^{-1} se distingue dans le BAP24% par rapport au BAP0%, cela est dû à la présence de SiO_2 de la cendre de bois.

Une bande plus intense, formant la bande dominante du spectre FTIR est centrée entre 1400 et 1426 cm^{-1} , elle est associée à la vibration d'étirement asymétrique des liaisons O-C-O. Sa présence suggère la présence de carbonates, constituant majoritaire dans nos BAP (Cheah et al. (2017), Kavyateja et al. (2020)); ceci corrèle bien avec les résultats de DRX. On remarque aussi, que l'intensité de ces bandes est influencée par le type de solution d'attaque. Il est remarquable de constater que la solution sulfurique est la plus agressive.

Les bandes de vibration principales du sulfate ont été observées dans la plage de 1200 à 1080 cm^{-1} en raison des étirements symétriques et asymétriques, tandis que les bandes plus faibles dans la plage de 664 à 601 cm^{-1} étaient dues aux flexions symétriques et asymétriques. Ces bandes indiquent la présence d'un composé de sulfate dans le BAP (Nasrazadani et al. (2016)), ce qui est cohérent avec les résultats de la diffraction des rayons X qui identifient la présence de gypse.

Dans cette étude, nous avons utilisé la technique FTIR pour détecter la dégradation chimique du BAP. Les résultats de l'analyse des spectres FTIR des échantillons de BAP exposés à différents environnements ont révélé que l'acide sulfurique était seul responsable de la dégradation du BAP.

V.3.2. Analyse des DRX des BAP exposés aux attaques chimiques

La méthode de diffraction des rayons X (DRX) est utilisée pour déterminer la nature et la structure des phases cristallines présentes dans les matériaux solides. Cette méthode permet de distinguer clairement les produits amorphes des produits cristallisés. Les données de diffraction fournissent trois informations essentielles: la position, l'intensité et la forme des pics. Chaque substance cristalline possède un diagramme de diffraction unique qui peut être identifié en le comparant à un échantillon de référence répertorié dans la base de données internationale JCPDS (Joint Committee for Powder Diffraction Standards), ICSD (Inorganic Crystal Structure Database) ou COD (Crystallography Open Database). Cela permet de déterminer la structure cristalline d'un matériau donné.

Les figures V.11 et V.12 représentent les diffractogrammes obtenus pour différents BAPs attaqués par différentes solutions (KOH, HCl, CH_3COOH , H_2SO_4 et NaCl). Les principaux pics sont attribués aux phases cristallines du calcaire CaCO_3 (ICSD 96-450-2444), portlandite (COD 96-100-8781), $\text{Ca}_2(\text{SiO}_4)$ (ICSD 96-231-0676) et $\text{Ca}_3(\text{SiO}_4)$ (ICSD 96-231-0676).

La majorité des travaux scientifiques sur les BAP mentionnent la formation prédominante de ces phases cristallines (Gauvin (2014), Siad et al. (2010), Xie et al. (2019)).

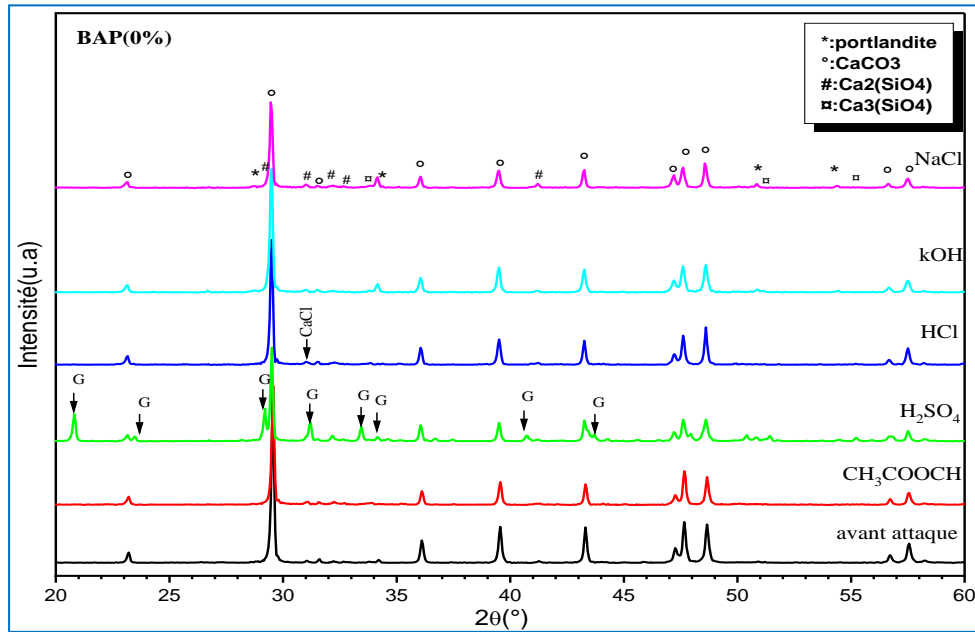


Figure V.11: Courbe DRX de BAP0% attaqué par les différentes solutions

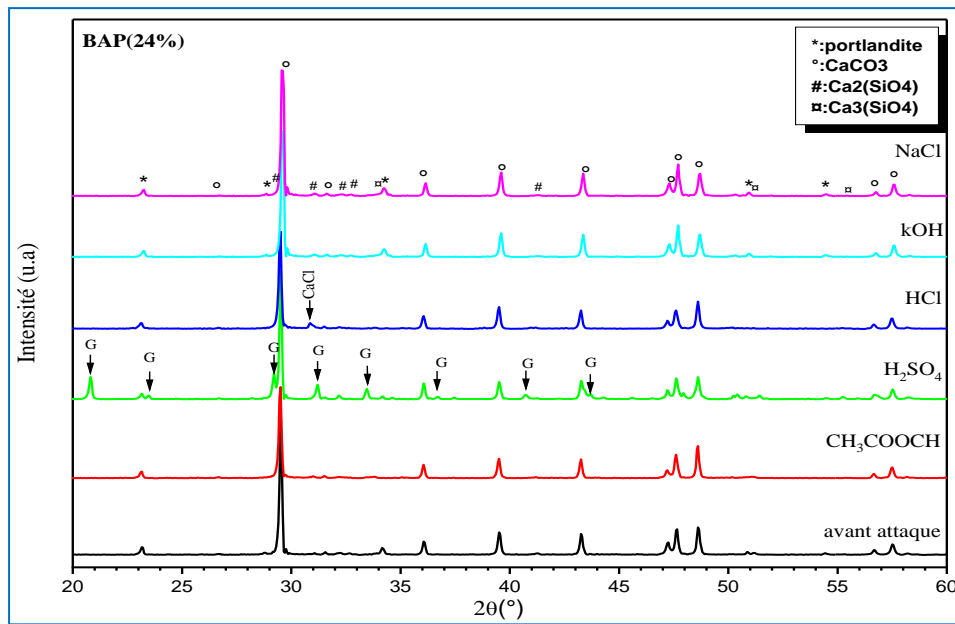


Figure V.12: Courbe DRX de BAP24% attaqué par les différentes solutions

D'après les spectrogrammes, de nouvelles phases cristallines apparaissent lors de l'attaque par les solutions H_2SO_4 et HCl sur les BAP (0%) et les BAP (24%). Par contre, toutes les autres solutions n'engendrent aucune nouvelle phase. Les pics de diffractions enregistrés sur les échantillons attaqués par l'acide sulfurique correspondent à la phase cristalline de gypse $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ (ICSD 98-015-1692). Ceci, concorde bien avec les résultats obtenus par les auteurs (Siad et al. (2010), Xie et al (2019)). Siad et al. (2010) ont détecté en plus de la gypse, la phase cristalline d'ettringite $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$, cela est sûrement dû à la présence de l'aluminium dans les constituants de base de leur matériaux, chose qui est presque totalement absente dans nos matières premières. En effet la seule source de

l'aluminium dans nos matières premières proviendrait du ciment CEM I qui d'après l'analyse chimique contient des traces d'aluminium. L'ettringite est un élément néfaste pour la construction de béton, le fait de ne pas l'avoir détectée dans nos produits constitue un avantage positif.

Pour les échantillons attaqués par l'acide chlorhydrique, on enregistre l'apparition d'une phase cristalline mineure CaCl (ICSD 98-005-6769) correspondant à la réaction d'une quantité de CaCO₃ avec la solution acide HCl.

V.3.3. Microstructure de la surface des BAP exposés aux attaques chimiques

V.3.3.1. Microstructure de la surface des échantillons à 18 % de cendre non attaqués

La figure V.13, montre la microstructure du BAP(18%) avant attaque. Il est clair, d'après les images, qu'avant l'attaque chimique, la microstructure du BAP (18%) était dense et ne présentait aucune fissure ou microfissure. On peut observer cependant certains pores de petite taille (< 10 µm) distribués sur la surface.

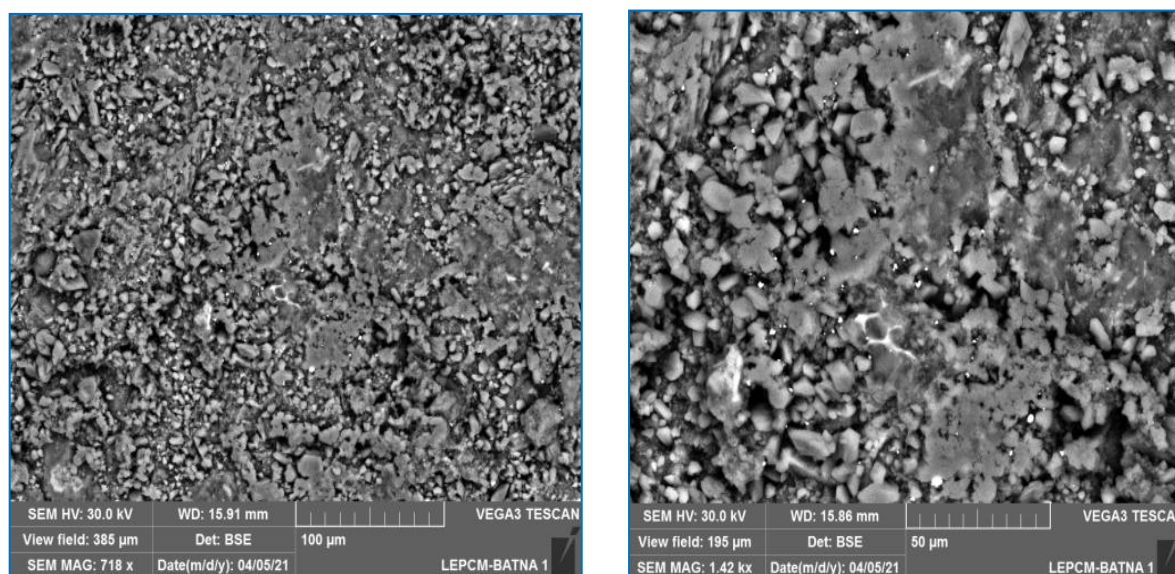
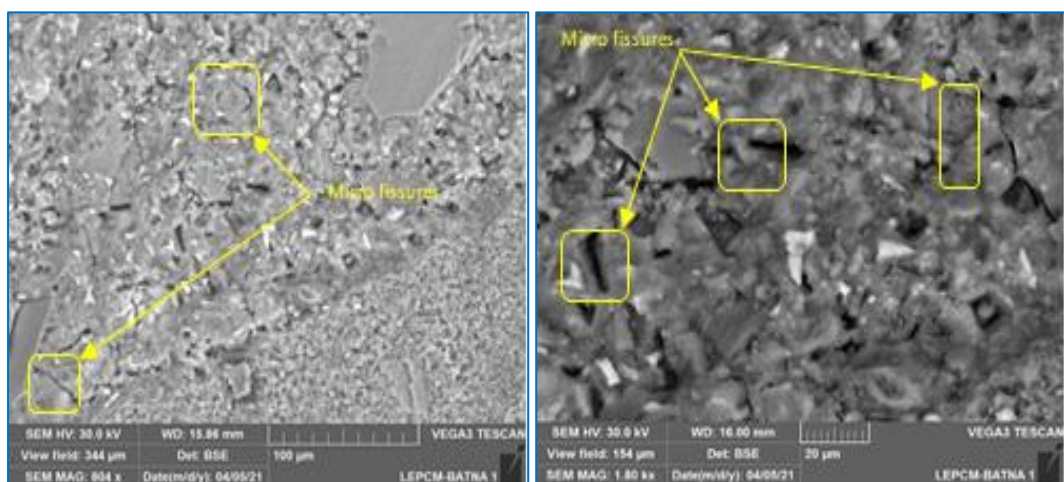


Figure V.13: Image MEB de la surface de BAP18% avant attaque chimique

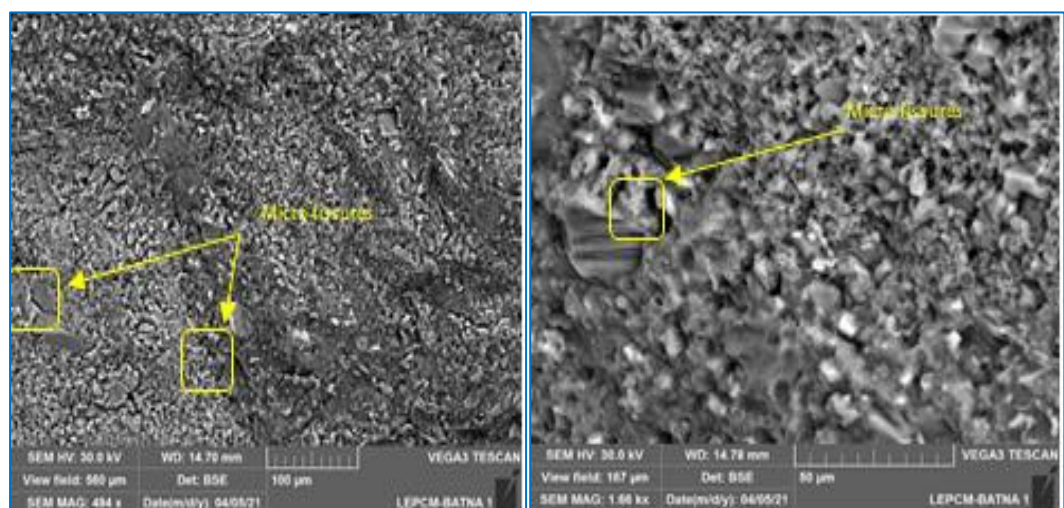
V.3.3.2. Microstructure des échantillons BAP (0 %) de cendres attaquées chimiquement pendant 120 jours

Les microstructures des BAP(0%) attaquées par les différentes solutions des acides (H₂SO₄, HCl et CH₃COOH) sont présentées dans les figures V.14. Les échantillons observés, montrent des microstructures très distinctes les uns des autres suivant le type d'acide utilisé.

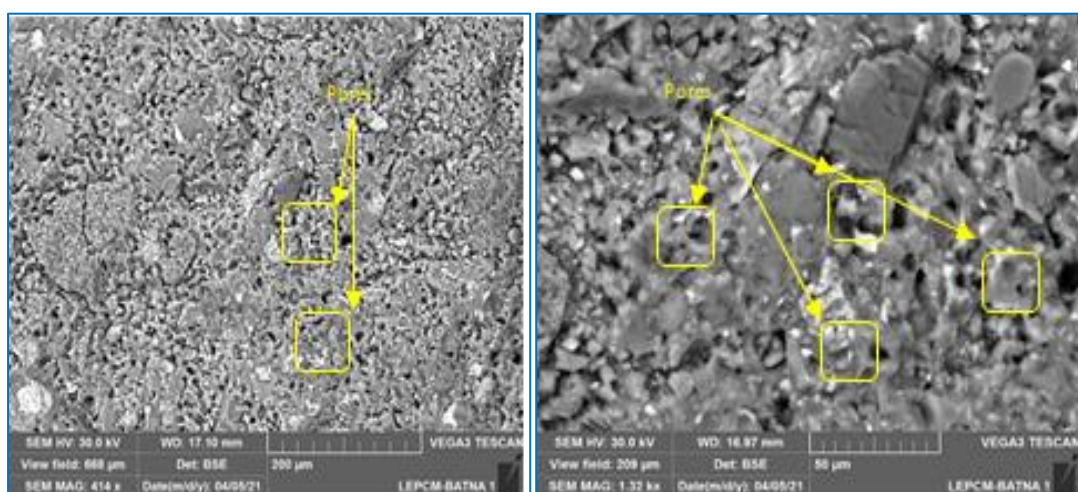
La microstructure du BAP (0%) attaquée par l'acide sulfurique est beaucoup plus dégradée que celle des autres solutions acides. En effet, des microfissures sont apparues après le cycle d'attaque sulfurique, et la largeur des fissures a atteint 50 µm. Les données EDS montrent clairement la présence du soufre correspondant à la phase gypse.



H_2SO_4



HCL



CH_3COOH

Figure V.14: Image MEB de la surface de BAP0% après attaque chimique

L'attaque par l'acide chlorhydrique est moins agressive, on remarque qu'il y a moins de microfissures sur la surface de l'échantillon. Cependant, on observe une lixiviation intense de la pâte de ciment à la surface du BAP, qui se traduit par une topologie hétérogène et complexe de la surface.

L'attaque par l'acide CH_3COOH ne présente presque aucune microfissure, mais on enregistre la présence d'une concentration assez élevée de pores. Aussi, il y a eu une lixiviation intense de la pâte de ciment à la surface du BAP.

V.3.3.3. Microstructure de la surface des échantillons à 18 % de cendre attaquées chimiquement pendant 120 jours

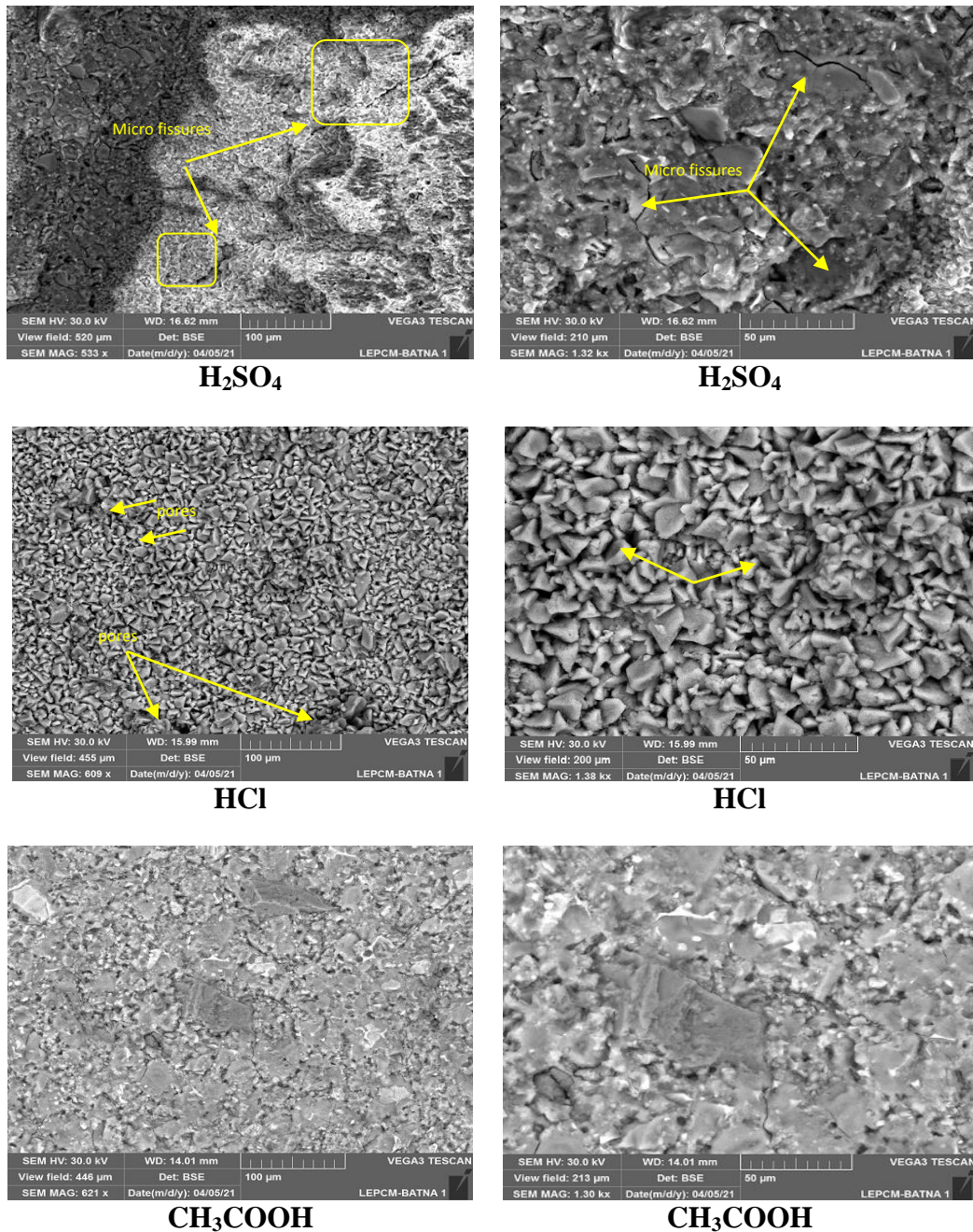


Figure V.15: Image MEB de la surface de BAP18% après attaque chimique

Les figures V.15 présentent les micrographies électroniques à balayage des surfaces de BAP (18%) immergés pendant 120 jours dans des solutions acides de (H_2SO_4 , HCL et CH_3COOH). Il est évident à partir des images SEM de la figure V.15 que la diffusion des ions sulfate s'est produite à une profondeur proche de la surface, induisant des microfissures de grande taille (100 μm).

Le BAP (18%) attaqué par de l'acide chlorhydrique présente une structure extrêmement compacte, épaisse et peu de pores peuvent être observés. Cependant on remarque une lixiviation assez importante, mettant en apparence une structure composée de grains inégaux qui se lient fermement à la surface.

L'attaque par l'acide CH_3COOH ne présente presque aucune micro fissure et en comparaison avec le BAP (18%) non attaqué, ne présente aucun changement notable.

V.4. Conclusion

D'après cette étude on peut conclure:

-L'absorption d'eau par immersion diminué avec l'augmentation du taux des cendres par contre l'absorption d'eau par capillarité augmente avec le temps et le taux de substitution sauf pour le BAP de 12% de taux de substitution qui présente une compacité maximale,

-La profondeur de pénétration des ions chlorures diminue dans tous les BAP à base de cendres de bois et les mélanges de BAP à 12% et 18% de cendre de bois présentent la meilleure résistance à la solution saline,

-Le BAP à 18% de cendres de bois a la meilleure résistance aux milieux agressifs acide chloridrique et acide sulfurique,

-Le BAP a base de 24% de taux de cendre présente la meilleure résistance dans l'acide acétique,

-L'analyse par DRX et FTIR indique que les BAP avec cendres de bois résistent aux milieux agressifs (HCL, H_2SO_4 , CH_3COOH , NaCL, KOH),

- Le BAP (18%) attaqué par de l'acide chlorhydrique présente une structure extrêmement compacte,

- L'attaque par l'acide acétique ne présente presque aucune micro fissure.

D'une manière générale le remplacement partiel des fines calcaires par des cendres de bois influent positivement sur les propriétés des BAP et devient une solution importante à l'avenir qui permet de réduire l'utilisation de ces fines.

Conclusion général

Conclusions générales

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

L'utilisation de la cendre de bois comme substitut des fines calcaires présente plusieurs avantages. Tout d'abord, elle permet de réduire la quantité de matériaux extraits de carrières, préservant ainsi les ressources naturelles. De plus, la cendre de bois étant un déchet de biomasse, son utilisation favorise la transition vers une économie circulaire en valorisant les déchets et en réduisant la dépendance aux ressources fossiles.

Nos cendres de bois sont résultantes de l'incinération des chutes de taille et de sciages des arbres fruitiers et des plantes nocives par les agriculteurs sans aucune transformation, et leur utilisation comme ajout dans le BAP présente plusieurs avantages. Premièrement, cela permet de réduire la quantité de matériaux extraits de carrières, contribuant ainsi à la préservation des ressources naturelles. Deuxièmement, cela offre une solution pour valoriser un déchet industriel, réduisant ainsi la nécessité de son élimination et contribuant à la transition vers une économie circulaire.

Le remplacement partiel des fines calcaires par des cendres de bois engendre une diminution de la consistance mais reste acceptable, la capacité de remplissage augmente avec l'augmentation du pourcentage des cendres jusqu'à un taux de 18% où le risque de ségrégation est minimale, une stabilité satisfaisante et risque de ségrégation statique faible.

L'ajout des cendres de bois dans la formulation du BAP entraîne une diminution du temps d'écoulement pour atteindre une valeur de 8 secondes d'où une viscosité apparente minimale ce qui traduit par une bonne ouvrabilité.

La densité et la teneur en air occlus diminue avec l'ajout des cendres de bois pour atteindre une valeur minimale à 12% de taux de substitution, cette diminution peut être due à la forme angulaire des cendres de bois qui entraîne un arrangement dans la structure interne du BAP et rend sa compacité maximale à ce taux.

Les mélanges à base de cendres de bois enregistrent les meilleures résistances en compression au jeune âge et à long terme qui est due à la présence de la Portlandite accélère la formation du gel C-S-H par une réaction d'hydratation secondaire. La meilleure résistance en compression est donnée par le BAP de 18% de taux de substitution à l'âge 28 jours.

Le comportement en traction par flexion est le même qu'en compression au jeune âge, et la résistance maximale est donnée par le BAP de 18% de taux de substitution à long terme.

Les BAP contenant des cendres de bois présentent des résistances et des duretés à la surface supérieure à celle du BAP témoins, et influent significativement sur l'homogénéité des BAP.

Les vitesses ultrasoniques ont montré que les BAP à base de cendres sont des BAP à très haute résistance.

Les cendres de bois à un effet positif sur le module d'élasticité des bétons qui est du à l'augmentation de l'adhésivité de la zone de transition inter facial, pate de ciment/granulats fins.

L'analyse par DRX et FTIR indique que ce matériau n'est pas inerte et participe à la réaction chimique d'hydratation.

L'absorption d'eau par immersion diminué avec l'augmentation du taux des cendres par contre l'absorption d'eau par capillarité augmente avec le temps et le taux de substitution sauf pour le BAP de 12% de taux de substitution qui présente une compacité maximale.

La profondeur de pénétration des ions chlorures diminue dans tous les BAP à base de cendres de bois et les mélanges de BAP à 12% et 18% de cendre de bois présentent la meilleure résistance à la solution saline.

Le BAP à 18% de cendres de bois a la meilleure résistance aux milieux agressifs.

L'analyse par DRX et FTIR indique que les BAP avec cendres de bois résistent aux milieux agressifs (HCL, H₂SO₄, CH₃COOH, NaCL, KOH)

En conclusion, l'étude de la substitution des fines calcaires par des cendres de bois dans un BAP ouvre des perspectives intéressantes pour une construction plus durable et respectueuse de l'environnement. Cependant, une approche prudente et basée sur des données scientifiques solides est nécessaire pour garantir que l'utilisation des cendres de bois dans le BAP répond aux exigences de performance et de durabilité nécessaires dans diverses applications de construction.

Bibliographie

Bibliographié

- Akram, T., Memon, S. A., & Obaid, H. (2009). Production of low cost self compacting concrete using bagasse ash. *Construction and Building Materials*, 23(2), 703–712. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.02.012>
- 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>
- Bhat, J. A. (2021). Mechanical behaviour of self compacting concrete: Effect of wood ash and coal ash as partial cement replacement. *Materials Today: Proceedings*, 42, 1470–1476. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.01.311>.
- Boughamsa, O., Houria, H., Leila, K., Mouloud, B., Assia, A., & Chaher, R. (2020). Valorization of marble. *Advances in Concrete Construction*, 9(2), 217. <https://doi.org/10.12989/acc.2020.9.2.217>.
- Cheah, C. B. (2011). Properties of high calcium wood ash and densified silica fume blended cement. *International Journal of Physical Sciences*, 6(28). <https://doi.org/10.5897/ijps11.1485>
- Cheah, C. B., Samsudin, M. A., Ramli, M., Part, W. K., & Tan, L. S. (2017). The use of high calcium wood ash in the preparation of ground granulated blast furnace slag and pulverized fly ash geopolymers: A complete microstructural and mechanical characterization. *Journal of Cleaner Production*, 156, 114–123. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.04.026>.
- Chowdhury, S., Mishra, M. A., & Suganya, O. (2015). The incorporation of wood waste ash as a partial cement replacement material for making structural grade concrete: An overview. *Ain Shams Engineering Journal*, 6(2), 429–437. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2014.11.005>.
- Cuenca, J., Rodriguez, J. A., Martín-Morales, M., Sánchez-Roldán, Z., & Zamorano, M. (2013). Effects of olive residue biomass fly ash as filler in self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 40, 702–709. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.09.101>
- Da Luz., G. M., & Sousa-Coutinho, J. (2013). Strength and durability of cement with forest waste bottom ash. *Construction and Building Materials*, 41, 897–910. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.11.081>.
- Demin, J., Jiang, D. M., Lv, S., Cui, S., Sun, S., Song, X., He, S., & Zhang, J. (2021). Effect of flame-retardant rice straw fibers on properties of fiber cement-based composites at high temperatures. *Journal of Building Engineering*, 44, 102923. <https://doi.org/10.1016/j.job.2021.102923>
- Elinwa, A. U., Ejeh, S., & Mamuda, A. M. (2008). Assessing of the fresh concrete properties of self-compacting concrete containing sawdust ash. *Construction and Building Materials*, 22(6), 1178–1182. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.02.004>
-

- Fusade, L., Viles, H., Wood, C., Burns, C. (2019). The effect of wood ash on the properties and durability of lime mortar for repointing damp historic buildings. *Construction and Building Materials*, 212: 500-513. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.326>
- Gauvin, G. (2014). Beton plus resistant grace aux cendres de la cane a sucre, Forum Politique des Iles, Chagos Madagascar.
- Gritsada, S., Makul, N. (2013). Use of increasing amounts of bagasse ash waste to produce self-compacting concrete by adding limestone powder waste. *Journal of Cleaner Production*, 57: 308-319. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.06.009>
- Hasnain, M., Javed, U., Ali, A., & Zafar, M. (2021). Eco-friendly utilization of rice husk ash and bagasse ash blend as partial sand replacement in self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 273, 121753. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121753>.
- Hosseini, M., Awal, A. S. M. A., & Ehsan, A. M. (2015). Influence of palm oil fuel ash on fresh and mechanical properties of self-compacting concrete. *Sadhana-academy Proceedings in Engineering Sciences*, 40(6), 1989–1999. <https://doi.org/10.1007/s12046-015-0426-y>.
- Horsakulthai, V., Phiuvanna, S., & Kaenbud, W. (2011). Investigation on the corrosion resistance of bagasse-rice husk-wood ash blended cement concrete by impressed voltage. *Construction and Building Materials*, 25(1), 54–60. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.06.057>.
- Kakali, G., Tsvivilis, S., Aggeli, E., & Bati, M. (2000). Hydration products of C 3 A, C 3 S and Portland cement in the presence of CaCO₃. *Cement and Concrete Research*, 30(7), 1073–1077. [https://doi.org/10.1016/s0008-8846\(00\)00292-1](https://doi.org/10.1016/s0008-8846(00)00292-1).
- Kavyateja, B. V., Jawahar, J. G., & Sashidhar, C. (2020). Effect of alccofine and fly ash on analytical methods of self-compacting concrete. *Innovative Infrastructure Solutions*, 5(3). <https://doi.org/10.1007/s41062-020-00332-9>.
- Kim, K. W., Park, K. T., Ates, F., Kim, H. G., & Woo, B. H. (2022). Effect of pretreated biomass fly ash on the mechanical properties and durability of cement mortar. *Case Studies in Construction Materials*, 18, e01754. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01754>.
- Kosmatka, S. H. et Michelle L. Wilson. (2009). Design and Control of Concrete Mixtures. *Portland Cement Association*.
- Kumar, N. et Barbato. M., (2022). Effects of sugarcane bagasse fibers on the properties of compressed and stabilized earth blocks, *Construction and Building Materials*, Volume 315, 10 January 2022, 125552. doi : <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125552>.
- Lothenbach, B., Saout, G. L., Gallucci, E., & Scrivener, K. (2008). Influence of limestone on the hydration of Portland cements. *Cement and Concrete Research*, 38(6), 848–860. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2008.01.002>.

- Memon, R. P., Achekezai, L., Sam, A. R. M., Awal, A. S. M. A., & Memon, U. (2017). Performance of sawdust concrete at elevated temperature. *Jurnal Teknologi*. <https://doi.org/10.11113/jt.v80.9826>.
- McTavish, M. J., Gorgolewski, A., Murphy, S. J., & Basiliko, N. (2020). Field and laboratory responses of earthworms to use of wood ash as a forest soil amendment. *Forest Ecology and Management*, 474, 118376. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118376>
- Monteny, J., Vincke, E., Beeldens, A., De Belie, N., Taerwe, L., Van Gemert, D., & Verstraete, W. (2000). Chemical, microbiological, and in situ test methods for biogenic sulfuric acid corrosion of concrete. *Cement and Concrete Research*, 30(4), 623–634. [https://doi.org/10.1016/s0008-8846\(00\)00219-2](https://doi.org/10.1016/s0008-8846(00)00219-2)
- Moretti, J. P., Nunes, S. O. V., & Sales, A. (2018). Self-compacting concrete incorporating sugarcane bagasse ash. *Construction and Building Materials*, 172, 635–649. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.277>.
- Naik, T. R., Kraus, R.N., Siddique, R. (2002). Demonstration of manufacturing technology for concrete and CLSM utilizing wood ash from Wisconsin. UWM Centre for By product Utilization, 538: 124.
- Nasrazadani, S., Eghtesad, R., Sudoi, E., Vupputuri, S., Ramsey, J. D., & Ley, M. T. (2016). Application of Fourier transform infrared spectroscopy to study concrete degradation induced by biogenic sulfuric acid. *Materials and Structures*, 49(5), 2025–2034. <https://doi.org/10.1617/s11527-015-0631-5>.
- Neville, (1996). A.M. Properties of concrete, fourth Ed., Wiley, New York, 1996.
- Olatokunbo, M. O., Olutoge, F., Omole, D., Babafemi, A. (2021). Influence of palm ash on properties of light weight self-compacting concrete. *Cleaner Engineering and Technology*, 4: 100233. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2021.100233>
- Omran, A., Soliman, N., Xie, A., Davidenko, T., & Tagnit-Hamou, A. (2018). Field trials with concrete incorporating biomass-fly ash. *Construction and Building Materials*, 186, 660–669. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.084>
- Rajamma, R., Ball, R. J., Tarelho, L. A., Allen, G. R., Labrincha, J. A., & De Sousa Ferreira, V. E. (2009). Characterisation and use of biomass fly ash in cement-based materials. *Journal of Hazardous Materials*, 172(2–3), 1049–1060. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.07.109>.
- Ramdane, R., Kherraf, L., Abdelouahed, A., & Belachia, M. (2022). Influence of biomass ash on the performance and durability of mortar. *Civil and Environmental Engineering Reports*, 32(2), 53–71. <https://doi.org/10.2478/ceer-2022-0019>.
- Ramos, T., Matos, A. R., & Sousa-Coutinho, J. (2013). Mortar with wood waste ash: Mechanical strength carbonation resistance and ASR expansion. *Construction and Building Materials*, 49, 343–351. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.08.026>

- Rodier, L. (2014). Matériaux de construction en zone tropicale humide- Potentialités de sous produits ou de matériaux naturels locaux en substitution ou en addition à la matrice cimentaire, Thèse de doctorat, université des Antilles et de la Guyane.
- Safiddine, S., Debieb, F., Khatib, J., Menadi, B., & Soualhi, H. (2017). Effect of crushed sand and limestone crushed sand dust on the rheology of cement mortar. *Applied Rheology*, 27(1), 12–20. <https://doi.org/10.3933/applrheol-27-14490>.
- Salam, M. A., Safiuddin, M., & Jumaat, M. Z. (2015). Non-destructive evaluation of self-consolidating high-strength concrete incorporating palm oil fuel ash. *British Journal of Applied Science and Technology*, 11(4), 1–13. <https://doi.org/10.9734/bjast/2015/19991>.
- Shen, J., Yurtdas, I., Diagana, C., Li, A. (2008). Une nouvelle méthode de formulation des bétons autoplaçants (BAP). *XXVIe Rencontres Universitaires de Génie Civil, Nancy*, 4 au 6 juin 2008.
- Siad, H., Mesbah, H.A., Kamali Bernard, S., Khelafi, H. and Mouli, M. (2010) ,Influence of natural pozzolan on the behavior of self-compacting concrete under sulphuric and hydrochloric acid attacks, comparative study, *The Arabian Journal for Science and Engineering*, Volume 35, Number 1B183-195.
- Sua-Iam, G., & Makul, N. (2013). Use of increasing amounts of bagasse ash waste to produce self-compacting concrete by adding limestone powder waste. *Journal of Cleaner Production*, 57, 308–319. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.06.009>.
- Trezza, M. A., & Lavat, A. E. (2001). Analysis of the system $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\text{--CaSO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O--CaCO}_3\text{--H}_2\text{O}$ by FT-IR spectroscopy. *Cement and Concrete Research*, 31(6), 869–872. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(01\)00502-6](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(01)00502-6).
- Usman, M., Khan, A. A., Farooq, S. H., Usman, M., Li, Z., Khushnood, R. A., & Rizwan, S. (2018). Eco-friendly self-compacting cement pastes incorporating wood waste as cement replacement: A feasibility study. *Journal of Cleaner Production*, 190, 679–688. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.04.186>.
- Villar-Cociña, E., Rojas, M.F., Morales, E.V. (2008). Sugar cane wastes as pozzolanic materials: application of mathematical model. *ACI Materials Journal*, 105(3): 258–264.
- Wang, S., Miller, A., Llamazos, E., Fonseca, F. L. A., & Baxter, L. L. (2008). Biomass fly ash in concrete: Mixture proportioning and mechanical properties. *Fuel Processing Technology*, 87(3), 365–371. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2007.05.026>.
- Wang, S., & Baxter, L. L. (2007). Comprehensive study of biomass fly ash in concrete: Strength, microscopy, kinetics and durability. *Fuel Processing Technology*, 88(11–12), 1165–1170. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2007.06.016>.
- Wilson, W. (2012). Bétons durables à base de cendres d'écorces de riz, Mémoire de maîtrise, Université de Sherbrooke.

- Xie, J., Zhao, J., Wang, J., Wang, C., Huang, P., & Fang, C. (2019). Sulfate resistance of recycled aggregate concrete with ggbs and fly ash-based geopolymer. *Materials*, *12*(8), 1247. <https://doi.org/10.3390/ma12081247>.
- Yuan, H., Dangla, P., Chatellier, P., & Chaussadent, T. (2013). Degradation modelling of concrete submitted to sulfuric acid attack. *Cement and Concrete Research*, *53*, 267–277. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2013.08.002>.
- Zelić, J., Krstulović, R., Tkalčec, E., & Krolo, P. (2000). The properties of Portland cement-limestone-silica fume mortars. *Cement and Concrete Research*, *30*(1), 145–152. [https://doi.org/10.1016/s0008-8846\(99\)00216-1](https://doi.org/10.1016/s0008-8846(99)00216-1).
- Zivica, V., & Bajza, A. (2002). Acidic attack of cement-based materials—a review Part 2. Factors of rate of acidic attack and protective measures. *Construction and Building Materials*, *16*(4), 215–222. [https://doi.org/10.1016/s0950-0618\(02\)00011-9](https://doi.org/10.1016/s0950-0618(02)00011-9)