

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



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

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

**RAMDANE RIHAB**

Thème

**VALORISATION DES CENDRES COMME  
AJOUT DANS LES FORMULATIONS D'UN  
MORTIER ET D'UN BETON HYDRAULIQUE**

**Caractérisations-Formulation-Performances -Durabilité**

Soutenue publiquement le : 27-04-2023

Dirigée par

Directrice de thèse	Mme Kherraf Leila	MCA	Université de Skikda
Co-directeur de thèse	Mr Belachia Mouloud	Pr	Université de Guelma

Devant le jury composé de:

Présidente	Hebhoub Houria	Pr	Université de Skikda
Examinateur	Derabla Riad	MCA	Université de Skikda
Examinatrice	Kechkar Chiraz	MCA	Université de Guelma
Invitée	Abdelouahed Assia	MCA	Université de Skikda

# *Remerciement*

Je tiens à remercier infiniment ma directrice de thèse Madame Kherraf Leila pour ses conseils, sa patience et son soutien durant cette période d'encadrement.

Mes plus sincères remerciements vont à mon co-directeur de thèse Monsieur Belachia Mouloud qui m'a aidé par ses conseils et ses orientations précieuses.

Mes vifs remerciements vont aux membres de jury de m'avoir attribué l'honneur et accepter d'examiner ma thèse de doctorat.

Sans oublier le personnel et les ingénieurs du laboratoire du département de génie civil, LNHC Skikda et enfin le laboratoire de la cimenterie de Hadjar-Soud.



# *Dédicace*

Au nom de Dieu le Clément, le Miséricordieux,

Je dédie ce travail à

Mes parents, qui m'ont soutenu durant ces années d'études, qu'ils trouvent ici le témoignage  
de ma profonde reconnaissance.

Ma sœur et mes frères.

Ma nièce et mon neveu.

A tous ceux que j'aime.



# TABLE DES MATIERES

Résumé	
Abstract	
ملخص	
Table des matières	
Liste des figures	I
Liste des tableaux	IV
Introduction générale	2

## Chapitre I : Synthèse bibliographique

I.1. Introduction	5
I.2. Le ciment	6
I.2.1. Définition	6
I.2.2. Processus de fabrication du ciment	7
I.2.3. Impact de la fabrication du ciment sur l'environnement	8
I.2.4. La substitution du ciment par un autre matériau dans la confection du béton	9
I.3. Les cendre de bois	10
I.3.1. définition	10
I.3.2. Caractéristiques chimiques et minéralogiques des cendres de bois	10
I.3.3. Provenance des cendres de bois	12
I.3.4. Variabilité des cendres de bois	13
I.3.5. Utilisations usuelles et antiques des cendres de bois	13
I.3.5. 1. Engrais et amendement	13
I.3.5. 2. Lessive	14
I.3.5. 3. Déverglaçage des chaussées	14
I.3.5.4. Amélioration des sols	14
I.3.6. D'autres types de cendres végétales valorisées dans le ciment	15
I.3.6. 1. Cendres de balles de riz	15
I.3.6. 2. Cendres de grignon d'olive	15
I.3.6. 3. Cendres de cannes à sucre	16
I.3.7. Avantage de la substitution du ciment par les cendres	16
I.4. Valorisation des cendres de bois dans les matériaux de construction	17
I.5. Conclusion	21

## Chapitre II : Caractérisation des matériaux

II.1. Introduction	23
II.2. Caractérisation des matériaux	23
II.2.1. Matériaux utilisés pour le mortier	23
II.2.1.1. Le ciment	23
II.2.1.2. Les cendres de bois	25
II.2.1.3. Le sable de dune	26
II.2.1.4. Eau de gâchage	27
II.2.2. Matériaux utilisés pour le béton	28
II.2.2.1. Ciment	28

II.2.2.2. Cendres de bois	29
II.2.2.3. Granulats	29
II.2.2.4. Adjuvant	32
II.2.2.5. L'eau de gâchage	32
II.3. Conclusion	33

### **Chapitre III : Programme expérimental et méthodologie d'essais**

III.1. Introduction	35
III.2. Programme expérimental	35
III.2.1. Programme expérimental réalisé sur le mortier	35
III.2.1.1. Formulation des mélanges	35
III.2.1.2. Fabrication des mélanges de mortier	36
III.2.1.3. Méthodes d'essais sur mortier	40
III.2.2. Programme expérimental réalisé sur le béton 50	
III.2.2.1. Approche théorique de la formulation du béton hydraulique	50
III.2.2.2. Formulation des mélanges	51
III.2.2.4. Formulation des mélanges de béton contenant des cendres de biomasse	52
III.2.2.5. Fabrication des mélanges de béton	53
III.2.2.6. Méthodes d'essais	55
III.4. Conclusion	64

### **Chapitre IV : Influence de la substitution partielle du ciment par les cendres de bois sur les propriétés du mortier**

IV.1. Introduction	67
IV.2. Influence de la substitution partielle du ciment par les cendres sur le mortier	67
IV.2. 1. Densité	67
IV.2. 2. Consistance	68
IV.2. 3. Air occlus	68
IV.2. 4. Résistance à la compression	69
IV.2. 5. Résistance à la traction par flexion	70
IV.2. 6. Absorption d'eau par immersion	71
IV.2. 7. Absorption d'eau par capillarité	71
IV.2. 8. Pénétration des ions chlorure	72
IV.2. 9. Attaques chimiques par les acides	73
IV.2. 9.1. Attaque chimique par l'acide chlorhydrique (HCL)	73
IV.2. 9.2. Attaque chimique par l'acide sulfurique (H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> )	74
IV.2. 10. Variation dimensionnelle	75
IV.2. 11. Retrait	75
IV.2. 12. Gonflement	76
IV.3. Conclusion	76

### **Chapitre V : Influence de la substitution partielle du ciment par les cendres de bois sur les propriétés du**

V.1. Introduction	79
V.2. Influence de la substitution partielle du ciment par les cendres sur le béton	79
V.2.1. Densité	79
V.2.2. Ouvrabilité	79
V.2.3. Résistance à la compression	80
V.2.4. Résistance à la traction par flexion	81
V.2.5. Résistance en compression obtenue par l'essai scléromètre	81

V.2.6. Résistance à la compression obtenue par ultrason	82
V.2.7. Combinaison ultrason/scléromètre	83
V.2.8. Absorption d'eau par immersion	83
V.2.9. Absorption d'eau par capillarité	84
V.2.10. Pénétration des chlorures	85
V.2.11. Résistance face aux milieux agressifs (les acides et les bases)	85
V.2.11.1. Attaque chimique par l'acide chlorhydrique (HCL)	85
V.2.11.2. Attaque chimique par l'acide sulfurique (H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> )	87
V.2.11.3. Attaque chimique par l'd'acide acétique (CH <sub>3</sub> COOH)	88
V.2.11.4. Attaque chimique par l'hydroxyde de potassium (KOH)	89
V.2.11.5. Attaque chimique par les chlorures de sodium (NaCl)	91
V.3. Conclusion	92
Conclusion générale	95
Références bibliographique	98

## RESUME

Symbole de l'artificialisation des terres et de la densification urbaine, le secteur de la construction par son ampleur occupe une place centrale parmi les consommateurs des ressources naturelles et industrielles. Les soucis environnementaux et l'insécurité énergétique croissantes ces dernières années à cause de la consommation énergétique globale du secteur et de l'impact carbone inhérent à utilisation massive du béton de ciment ont rendu le recours à l'énergie renouvelable et les matériaux biomasse pour développer de nouveaux composites cimentaires une impérative vitale. Ce présent travail de thèse, s'inscrit dans ce même contexte, les cendres de bois, un déchet disponible localement, ont été utilisé en substitution massive partielle du ciment dans la composition des matrices cimentaires d'étude à savoir: le mortier et le béton, avec les taux de 5%, 10% et 15% pour le mortier et de 6%, 12% et à 18% pour le béton hydraulique. Les résultats sont ensuite comparés avec ceux des mélanges témoins sans ajouts. L'influence de cette substitution sur les caractéristiques du mortier est évaluée après l'exécution d'essais (densité, consistance, air occlus, résistance à la compression et à la traction par flexion, absorption par immersion et par capillarité, pénétration des chlorures, résistance chimique face aux solutions HCL et H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, DRX et la variation dimensionnelle). L'impact de cette substitution est aussi étudié sur les propriétés du béton hydraulique en réalisant une série d'essais suivant des normes en vigueur (densité, ouvrabilité, résistance à la compression et la traction par flexion, résistance obtenue par scléromètre, résistance obtenue par ultrason, méthode combinée, absorption par immersion et par capillarité, pénétration des chlorures, résistance chimique face aux solutions HCL et H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, CH<sub>3</sub>COOH, KOH et NaCl). Les résultats obtenus ont montré que le mortier contenant 5 % de cendres de bois présente la meilleure résistance à la compression au jeune âge et améliore la résistance à la traction par flexion à l'âge de 2, 7 et 28 jours. Les résultats ont aussi indiqué que le béton avec 6% de cendres a montré les meilleures performances en termes de résistance à la surface par scléromètre, résistance à l'aide de l'ultrason ainsi que la résistance face aux attaques des ions chlorures.

**Mots-clés :** cendres, bois, déchet, incinération, ciment, béton, substitution, caractéristiques.

## **ABSTRACT**

Symbol of the artificialization of land and urban densification, the construction sector by its magnitude occupies a central place among the consumers of natural and industrial resources. Environmental concerns and growing energy insecurity in recent years due to the overall energy consumption of the sector and the carbon impact inherent in the massive use of cement concrete have made the use of renewable energy and biomasse materials to develop new cementitious composites a vital imperative. This present thesis work is part of this same context, wood ashes, a waste available locally, have been used in partial massive substitution of cement in the composition of the cementitious matrices of study, namely: mortar and concrete, with rates of 5%, 10% and 15% for mortar and 6%, 12% and 18% for hydraulic concrete. The results are then compared with those of the control mixtures without additions. The influence of this substitution on the characteristics of the mortar is necessary after carrying out tests (density, consistency, entrapped air, compressive and tensile strength by bending, absorption by immersion and by capillarity, penetration of chlorides, chemical resistance to HCL and H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> solutions, XRD and dimensional variation). The impact of this substitution is also taken into account on the properties of the hydraulic concrete by carrying out a series of tests according to the standards in force (density, workability, resistance to compression and traction by bending, resistance obtained by sclerometer, resistance obtained by ultrasound, combined method, absorption by immersion and by capillarity, penetration of chlorides, chemical resistance to HCL and H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, CH<sub>3</sub>COOH, KOH and NaCl solutions). The results showed that the mortar containing 5% wood ash presents the better compressive strength at early age and improved flexural tensile strength at 2, 7 and 28 days of age. The results also indicated that the concrete with 6% ash showed the best performance in terms of surface resistance by sclerometer, resistance using ultrasound as well as resistance to chloride ion attack.

**Keywords:** ash, wood, waste, incineration, cement, concrete, substitution, characteristics.

## ملخص

رمزًا لتصنيع الأرض والتكثيف الحضري، يحتل قطاع البناء بحجمه مكانة مركزية بين مستهلكي الموارد الطبيعية والصناعية. أدت المخاوف البيئية وتزايد انعدام أمن الطاقة في السنوات الأخيرة بسبب الاستهلاك الكلي للطاقة في القطاع وتأثير الكربون الملازم للاستخدام المكثف لخرسانة الأسمنت إلى استخدام الطاقة المتجددة والمواد الحيوية - التي تم الحصول عليها من أجل تطوير مركبات أسمنتية جديدة. ضرورة حيوية. يعد هذا العمل البحثي جزءًا من نفس السياق ، فقد تم استخدام رماد الخشب ، وهو نفايات متوفرة محليًا ، في الاستبدال الجزئي الضخم للأسمنت في تكوين مصفوفات الدراسة الأسمنتية ، وهي: الملاط والخرسانة. بنسب 5% و 10% و 15% للملاط و 6% و 12% و 18% للخرسانة الهيدروليكية. ثم تتم مقارنة النتائج مع تلك الخاصة بمخاليط التحكم بدون إضافات. يعد تأثير هذا الاستبدال على خصائص الملاط ضروريًا بعد إجراء الاختبارات (الكثافة ، الاتساق ، الهواء المحاصر ، مقاومة الانضغاط والشد عن طريق الانحناء ، الامتصاص عن طريق الغمر والشعرية ، تغلغل الكلوريدات ، المقاومة الكيميائية لمحاليل HCL و H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ، XRD والاختلاف الأبعاد). يؤخذ تأثير هذا الاستبدال أيضًا في الاعتبار على خصائص الخرسانة الهيدروليكية من خلال إجراء سلسلة من الاختبارات وفقًا للمعايير السارية (الكثافة ، قابلية التشغيل ، مقاومة الانضغاط والجر عن طريق الانحناء ، المقاومة التي تم الحصول عليها بواسطة مقياس الصلابة ، المقاومة التي تم الحصول عليها عن طريق الموجات فوق الصوتية ، والطريقة المركبة ، والامتصاص عن طريق الغمر ، والشعرية ، واختراق الكلوريدات ، والمقاومة الكيميائية لمحاليل HCL و H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ، و CH<sub>3</sub>COOH ، و KOH ، و NaCl). أظهرت النتائج أن الملاط المحتوي على 5% من رماد الخشب يمثل قوة ضغط أفضل في وقت مبكر. العمر وقوة الشد المحسنة في عمر 2 و 7 و 28 يومًا. كما أشارت النتائج إلى أن الخرسانة التي تحتوي على 6% رماد أظهرت أفضل أداء من حيث مقاومة السطح بواسطة مقياس الصلابة والمقاومة باستخدام الموجات فوق الصوتية وكذلك مقاومة هجوم أيون الكلوريد.

**الكلمات المفتاحية:** الرماد، الخشب، النفايات، الحرق، الأسمنت، الخرسانة، الاستبدال، الخصائص.

# LISTE DES FIGURES

## Chapitre I : Synthèse bibliographique

Figure I-1: Ciment à l'échelle microscopique	6
Figure I-2: Les différents ateliers de la fabrication du ciment	7
Figure I-3: Fumée dégagée des cimenteries	9
Figure I-4: Cendres de bois	10
Figure I-5: Spéciation des macroéléments selon la méthode d'extractions séquentielles	11
Figure I-6: Cendres de foyer	12
Figure I-7: Cendres issues des déchets d'agriculture (Skikda)	13
Figure I-8: Utilisation des cendres de bois comme engrais	14
Figure I-9: Balles de riz	15
Figure I-10: Grignon d'olive	15
Figure I-11: Bagasse de canne à sucre	16
Figure I-12: Analyse par microscopie à balayage (MEB) d'un échantillon de cendre de bois (Swaptik et al, 2015)	17
Figure I-13: Influence de la substitution partielle du ciment par la combinaison ciment-fumée de silice sur la résistance à la compression du mortier suivant Othuman et al. (2014)	19
Figure I-14: Influence de la substitution partielle du ciment par les cendres de sciure de bois sur la résistance à la compression du béton suivant Marthong (2012)	20
Figure I-15: Effet de la substitution partielle des cendres volantes par les cendres de bois sur la porosité du mortier géopolymère selon Abdulkareem et al. (2018)	20
Figure I-16: Courbes calorimétriques du flux thermique (a) et de la chaleur (b) des échantillons de ciment avec et sans cendres de biomasses volantes suivant Kaminskas et Cesnauskas (2014)	21

## Chapitre II : Caractérisation des matériaux

Figure II-1: CEM I de la cimenterie de Msila	23
Figure II-2: Mesure de la densité	24
Figure II-3: Mesure de la surface spécifique de Blaine	24
Figure II-4: Essai perte au feu	25
Figure II-5 : Cendres de bois	26
Figure II-6: Sable de dune d'Oued Zhor	26
Figure II-7: Courbe d'analyse granulométrique du sable	27
Figure II-8: Courbe d'analyse granulométrique du sable de carrière (classe 0/4)	30
Figure II-9: Courbe d'analyse granulométrique des différentes classes de gravier utilisé	32

## Chapitre III : Programme expérimental et méthodologie d'essais

Figure III-1: Malaxeur à mortier	36
Figure III-2: Moule triple pour prisme (4×4×16) cm <sup>3</sup>	37
Figure III-3 : Moule triple équipé de plots	37
Figure III-4: Moule cubique (5x5x5) cm <sup>3</sup>	38
Figure III-5 : Table à chocs	38
Figure III-6: Enceinte climatique	39
Figure III-7: Etuve du laboratoire	39
Figure III-8: Essai de consistance du mortier par étalement	40

Figure III-9: Mesure de la densité	41
Figure III-10 : Aéromètre à mortier	41
Figure III-11: Presse hydraulique de flexion	42
Figure III-12: Dispositif et schéma mécanique de l'essai de traction par flexion trois points	42
Figure III.13: Dispositif et schéma de l'essai de compression sur éprouvette 4x4x16cm <sup>3</sup>	43
Figure III.14: Eprouvettes cubiques pour l'essai d'absorption par immersion	44
Figure III-15: Dispositif expérimental Essai absorption capillaire	45
Figure III-16: Eprouvettes cubiques 5x5x5 cm immergées dans les acides dosés à 5% d'HCL et 5% de H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	46
Figure III-17: Essai diffractométrie de rayons X	46
Figure III-18: Eprouvettes prismatiques immergées dans la solution NACL concentrée à	547
Figure III-19: Sciage des éprouvettes 4 x 4 x 16 cm de mortier	47
Figure III-20 : Versement des nitrates d'argent AgNO <sub>3</sub> et mesure de la profondeur de pénétration des chlorures	48
Figure III-21: Eprouvettes prismatiques équipées de plots	49
Figure III-22: Deformomètre	49
Figure III-23: schéma de dispositif utilisé pour mesurer le retrait et le gonflement	50
Figure III-24: Malaxeur à axe vertical	53
Figure III-25: Les différents types des moules utilisés	54
Figure III-26: Décoffrage des éprouvettes (15 x 15 x 15) cm <sup>3</sup>	54
Figure III-27: Conservation des éprouvettes dans l'eau	55
Figure III-28 : Essai d'affaissement au cône d'Abrams	56
Figure III-29: Essai de densité	56
Figure III-30: Essai résistance à la compression	57
Figure III-31 : Mode de rupture pyramidal du cube	57
Figure III-32: Essai résistance à la traction par flexion	58
Figure III-33: Résistance à la surface au scléromètre	59
Figure III-34: Partie graduée du scléromètre	59
Figure III-35: Essai ultrason	60
Figure III-36: Détermination du poids des éprouvettes pour l'essai absorption par immersion	61
Figure III-37: Essai absorption par capillarité du béton	62
Figure III-38: Essai résistance chimique	
Figure III-39: Conservation des éprouvettes dans les solutions chimiques	63
Figure III-40: Essai pénétration des ions chlorures	64

#### **Chapitre IV : Influence de la substitution partielle du ciment par les cendres de bois sur les propriétés du mortier**

Figure IV-1: Variation de la densité en fonction du taux de substitution	67
Figure IV-2: Variation de la consistance en fonction du taux de substitution	68
Figure IV-3: Effet du taux de substitution sur la variation de l'air occlus	69
Figure V-4: Influence du taux de substitution sur la résistance à la compression	69
Figure IV-5: Influence du taux de substitution sur la résistance à la traction par flexion	70
Figure IV-6: Variation de l'absorption en fonction du taux de substitution	71
Figure IV-7: Influence du taux de substitution sur l'absorption d'eau par capillarité	72
Figure IV-8: Variation de la profondeur de pénétration de chlorure en fonction du taux de substitution	72
Figure IV-9: Perte de masse en fonction de la période d'immersion dans 5% de HCL	73

Figure IV-10: Diffractométrie de rayons X (DRX) des échantillons immergées dans 5% de HCL	74
Figure IV-11: Perte de masse en fonction de la période d'immersion dans 5% de H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	74
Figure IV-12: Diffractométrie de rayons X (DRX) des échantillons immergées dans 5% de H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	75
Figure IV-13: Variation du retrait total en fonction du temps et du taux de substitution	75
Figure IV-14: Variation du gonflement en fonction du temps et du taux de substitution	76

## **Chapitre V : Influence de la substitution partielle du ciment par les cendres de bois sur les propriétés du béton**

Figure V-1: Influence de l'introduction des cendres sur la densité	79
Figure V-2: Variation de l'ouvrabilité en fonction du taux de substitution	80
Figure V-3: Influence du taux de substitution sur la résistance en compression	80
Figure V-4: Influence du taux de substitution sur la résistance en traction par flexion	81
Figure V-5: Résistance en compression obtenue par scléromètre	82
Figure V-6: Résistance en compression obtenue par ultrason	82
Figure V-7: Résistance à la compression obtenue par la méthode combinée	83
Figure V-8: Variation de l'absorption par immersion en fonction du taux de substitution	84
Figure V-9: Variation de l'absorption par capillarité en fonction de la racine carrée du temps	84
Figure V-10: Variation de la profondeur de pénétration de chlorure en fonction du taux de substitution	85
Figure V-11: Gain de masse en fonction de la période d'immersion dans 3.5% de HCL	86
Figure V-12: Perte de masse en fonction de la période d'immersion dans 3.5% de H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	87
Figure V-13: Eprouvette de béton après 120 jours de conservation dans 3.5% de H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	88
Figure V-14: Gain de masse en fonction de la période d'immersion dans 3.5% de CH <sub>3</sub> COOH	89
Figure V-15: Gain de masse en fonction de la période d'immersion dans 3.5% de KOH	90
Figure V-16: Eprouvette de béton après 120 jours de conservation dans 3.5% KOH	91
Figure V-17: Gain de masse en fonction de la période d'immersion dans 3.5% de NaCl	91
Figure V-18: Eprouvettes de béton après 120 jours de conservation dans les différentes solutions chimiques étudiées	92

# Liste des tableaux

## Chapitre I : Synthèse bibliographique

Tableau I-1: les principales substances émises dans l'air (en kg) pour la production de 1 kg de ciment portland (ATILH et al. 2002)	8
Tableau I-2: Teneurs totales en macro- et microéléments dans les cendres de bois selon la littérature. Les valeurs entre parenthèses représentent le coefficient de variation (Maltas et Sinaj 2014)	11

## Chapitre II : Caractérisation des matériaux

Tableau II-1: Composition chimique et minéralogique du ciment	25
Tableau II-2: Composition chimique des cendres de bois	26
Tableau II-3: Propriétés physiques de sable de dune	27
Tableau II-4: Analyse chimique de l'eau	28
Tableau II-5: Propriétés physico-chimiques du ciment	28
Tableau II-6: Propriétés chimiques des cendres de bois	29
Tableau II-7: Caractéristiques physiques du sable de carrière (classe 0/4)	29
Tableau II-8: Composition chimique de sable de carrière (classe 0/4)	30
Tableau II-9: Propriétés physico-chimiques des différentes classes de graviers utilisées	31
Tableau II-10: Analyse chimique des graviers provenant de la carrière El-ghedir	31
Tableau II.11: Caractéristiques du super plastifiant Poly flow SR 5400	32

## Chapitre III : Programme expérimental et méthodologie d'essais

Tableau III-1: Paramètres et essais effectués pour la partie mortier	35
Tableau III-2: Composition des mélanges de mortier	36
Tableaux III-3: Opérations de malaxage du mortier	
Tableau III.4: Différentes compositions utilisées dans l'étude du béton hydraulique contenant les cendres de biomasse	51
Tableau III.5: Formulation des mélanges de béton contenant des cendres de biomasse	52
Tableau III.5: Compositions des mélanges de béton contenant des cendres de biomasse	52
Tableau III.7: Méthode de malaxage des mélanges béton	53

# **INTRODUCTION GENERALE**

## Introduction générale

De nos jours, le béton, et plus particulièrement le béton de ciment est le type de béton le plus produit et consommé dans le monde. Associé à une urbanisation exponentielle, il est considéré comme étant le plus rentable et le plus facile à utiliser. Cependant, si l'on distingue son cycle de vie, on constate que la partie la plus polluante est celle de la production du ciment. Les fourneaux nécessaires à cette combustion requièrent des carburants fossiles et rejettent énormément de CO<sub>2</sub>.

La majorité des recherches menées ces dernières années en le domaine, vise à améliorer les technologies liées à la production du clinker. Elles portent principalement sur le fonctionnement des fours et le remplacement des roches utilisés par des déchets industriels ou de la biomasse, ce qui engendre la diminution de la température nécessaire au processus et un moindre rejet de CO<sub>2</sub> dû à la décarbonation du calcaire.

C'est dans ce contexte que s'inscrit cette investigation, on traite de l'usage de matériaux bio-sourcés dans les mortiers et les bétons. Nous allons procéder à l'élaboration d'un ciment à base de résidus d'incinération de bois, un déchet disponible localement.

Les cendres de bois aussi appelées les cendres de biomasse, sont issues de l'incinération de déchets organiques ou agricoles, ils trouvent sous forme de poudre fine d'une couleur grisâtre similaire à l'aspect visuel du ciment. On les récolte souvent de différents sites comme les champs d'agriculture où les paysans s'en débarrassent des restes de branches, troncs, feuilles,... etc après la fin de la récolte de chaque saison. Comme, on peut aussi trouver les cendres dans les sites de fabrication du charbon végétal. Ils sont des déchets disponibles avec des quantités considérables non exploités malheureusement, à l'exception de quelques utilisations traditionnelles comme des amendements pour le sol.

La substitution partielle du ciment par les cendres de bois dans les différents mélanges d'étude s'effectuera avec des dosages variables à fin d'examiner l'impact du taux de remplacement sur les propriétés des matrices cimentaires : mortier et du béton et ce, à l'état frais ainsi qu'à l'état durci et quelques aspects de durabilité. On essaye d'apporter des réponses aux questions suivantes :

- ✓ Ce matériau peut-il vraiment représenter un substituant potentiel du ciment ?
- ✓ Peut-il apporter des améliorations concernant les propriétés rhéologiques, physiques ou mécaniques ?
- ✓ Peut-il impacter positivement la durabilité du béton d'étude ?
- ✓ L'introduction de ce matériau dans la composition du béton peut-elle constituer une voie prometteuse pour sa valorisation ?

Pour répondre à ces préoccupations et bien traiter le sujet, ma thèse de doctorat comportera cinq chapitres :

- **Le premier chapitre** présente une description succincte des principaux matériaux utilisés comme le ciment et les cendres de bois et met l'accent sur les études antérieures élaborées en le domaine.

.- **Le deuxième chapitre** est dédié à la caractérisation des matériaux utilisés pour la confection des mélanges de mortier et du béton, sujet de notre enquête.

- Dans **le troisième chapitre**, on expose le programme expérimental, la formulation des mélanges, les méthodes suivies pour la confection des mortiers et des bétons suivant des normes en vigueur.

- **Le quatrième chapitre** traite de l'effet de la substitution partielle de ciment par des dosages variant de 0 à 15% des cendres de bois sur les propriétés des mortiers à l'état frais ainsi qu'à l'état durci. Les résultats expérimentaux obtenus seront illustrés sous forme de courbes et d'histogrammes et éventuellement interprétés et justifiés.

- **Le cinquième chapitre** est consacré à visualiser l'effet du remplacement massique partiel du ciment par des dosages variant de 0 à 18% des cendres de bois sur les propriétés du béton hydraulique à l'état frais ainsi qu'à l'état durci et quelques aspects de durabilité.

Enfin en conclusion générale dressée à partir des chapitres précédemment détaillés, elle collecte toutes les notions importantes ainsi que les résultats obtenus des différents essais effectués qu'on peut extraire de ce travail.

Caractéristiques visuelles des cendres de bois

# **CHAPITRE I : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE**

# I. Synthèse bibliographique

## I.1. Introduction

Les inquiétudes concernant l'environnement mondial et l'insécurité énergétique croissante ces dernières années ont augmenté la demande en énergie renouvelable et ses ressources.

La confection du béton et du mortier, deux matériaux classés parmi les plus utilisés au monde est basé sur le ciment, cet ingrédient clé est responsable d'une quantité importante d'émission de gaz de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère ainsi que d'autres gaz à effet de serre.

Le mortier est un mélange de sable, d'eau, de liant hydraulique (ciment ou chaux) et éventuellement d'adjuvant. Il se distingue du béton par l'absence de gravillons. Il existe une multitude de mortiers, que l'on obtient en faisant varier le liant, le sable (nature et granularité), les ajouts et les adjuvants (plastifiant, entraîneur d'air, hydrofuge, agent d'adhérence, fibres ...). On cite par exemple : le mortier de ciment, mortier de chaux et le mortier réfractaire.

On distingue plusieurs utilisations du mortier comme : les chapes, les travaux de maçonnerie courante, les calages, les scellements et les enduits.

Le béton d'un autre coté représente le mélange de plusieurs composants : ciment, eau, granulats et, le plus souvent, adjuvants qui constituent un ensemble homogène (**Cimbéton 2013**). La fabrication du béton était maîtrisée dès l'Antiquité par les Romains. Au IIe siècle on savait cuire le calcaire à 900°C pour en extraire le gaz carbonique et le transformer en chaux vive.

Il faut attendre le XIXe siècle pour obtenir les différents composés qui réagissent avec l'eau pour former des hydrates d'une grande résistance. C'est la naissance du ciment moderne tel que nous le connaissons.

Le béton est un mélange dont la composition a une profonde influence sur ses caractéristiques mais si les caractéristiques attendues sont la plupart du temps bien définies, la mise au point d'un béton approprié peut s'avérer plus délicate. Les paramètres ont en effet été nombreux : les données du projet, les données du chantier ainsi que les données liées aux propriétés du béton (**Ghomari 2014**).

En effet il existe plusieurs méthodes de formulation comme la méthode de Dreux Gorisse, la méthode de Bolomey et la méthode de Faury.

Notre thème de recherche s'articule autour de la valorisation des cendres de biomasse, un déchet disponible localement mais malheureusement négligé, dans les différentes compositions du mortier et du béton avec des taux variables. Ce chapitre représente une synthèse bibliographique des différents axes de notre problématique ainsi que les travaux antérieurs dans la littérature.

## I.2. Le ciment

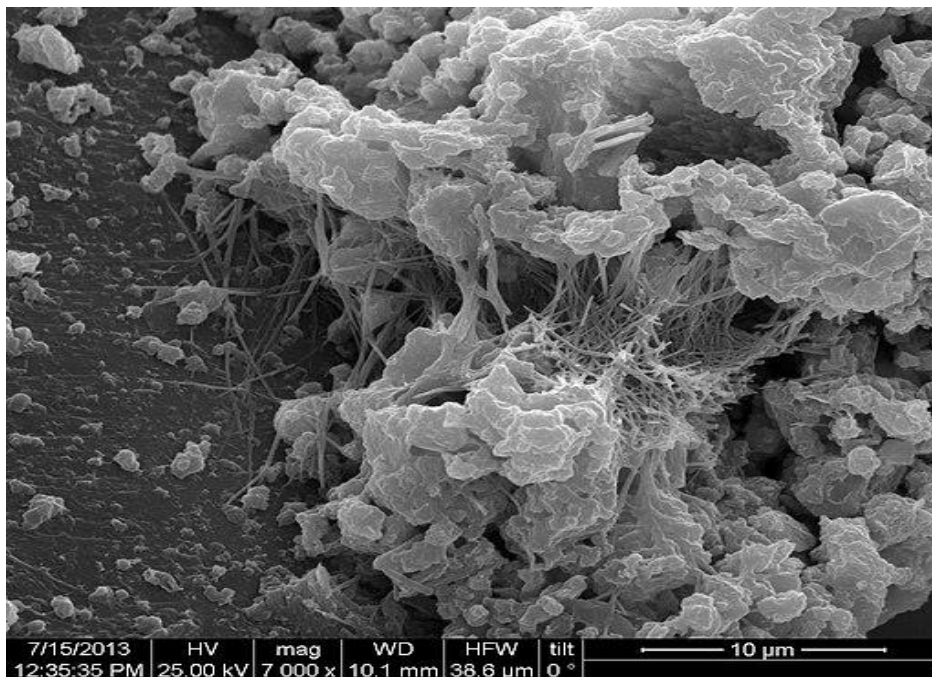
### I.2.1. Définition

Le ciment est un liant hydraulique, c'est-à-dire capable de faire prise dans l'eau. Il se présente sous l'aspect d'une poudre très fine qui, mélangée avec de l'eau, forme une pâte faisant prise et durcit progressivement dans le temps. Ce durcissement est dû à l'hydratation de certains composés minéraux notamment des silicates et d'aluminates de calcium. La proportion de chaux et de silice réactive devra être au moins de 50% de la masse de ciment. Les ciments courants ont pour produit essentiel ; le clinker associé à d'autres constituants. Ces constituants modifient les propriétés du ciment grâce à leurs caractéristiques chimiques ou physiques. Dans la mesure où ils sont des sous-produits d'autres industries, ils contribuent à amoindrir le prix revient (**Dreux et Fasta 1995**).

Le ciment (figure I-1) est une matière pulvérulente, à base de silicate et d'aluminate de chaux, obtenue par cuisson, en proportions variables selon les matières premières utilisées :

- Silicate tricalcique, ou  $C_3S$  ( $3 CaO, SiO_2$ ),
- Silicate bicalcique, ou  $C_2S$  ( $2 CaO, SiO_2$ ),
- Aluminate tricalcique, ou  $C_3A$  ( $3 CaO, Al_2O_3$ ),
- Aluminoferrite tricalcique, ou  $C_4AF$  ( $4 CaO, Al_2O_3, Fe_3O_3$ ).

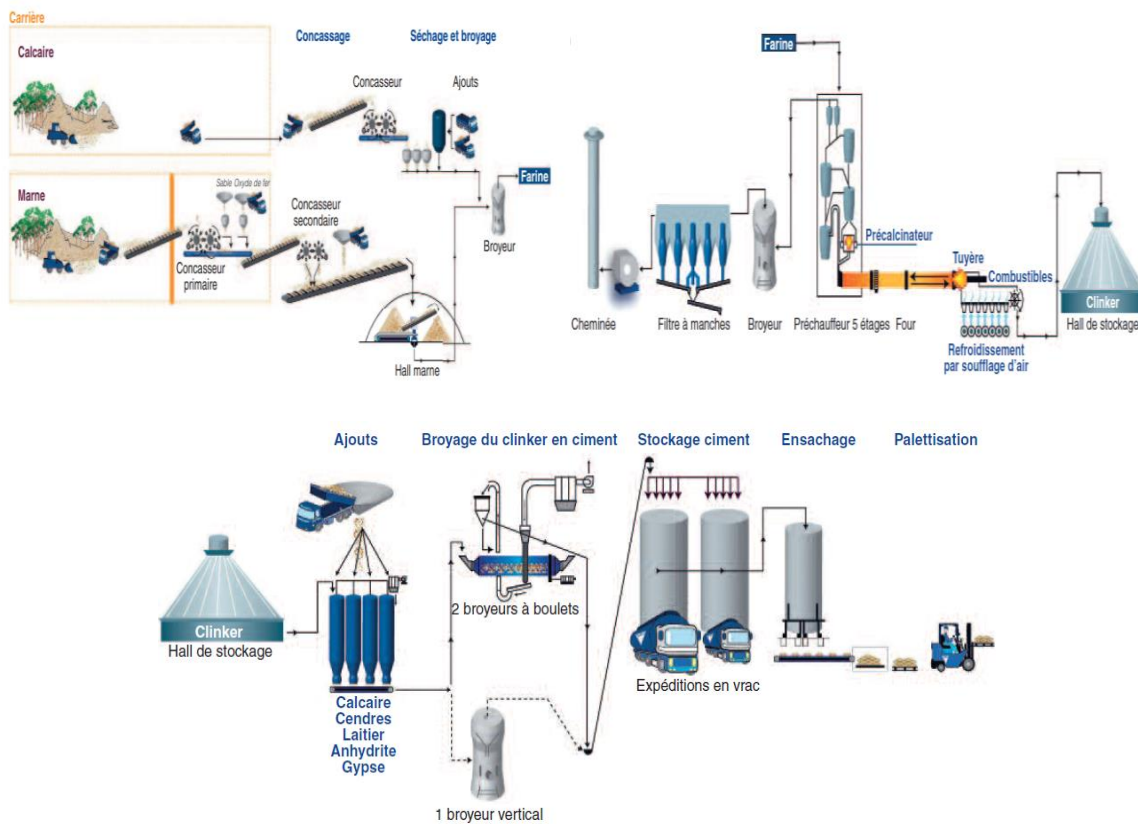
Les matières premières essentielles sont la roche calcaire et l'argile. Elles sont broyées et éventuellement additionnées de produits secondaires. Le mélange obtenu s'appelle le cru et est composé d'environ 80 % de calcaire et d'environ 20 % d'argile (**Futura Sciences 2013**).



**Figure I-1:** Ciment à l'échelle microscopique.

### I.2.2. Processus de fabrication du ciment

La fabrication du ciment est un processus très complexe (figure I-2), en effet il existe plusieurs procédés de fabrication du ciment notamment par le mode de préparation des matières premières. On distingue ainsi les procédés en voie humide ou les matières premières sont mélangées à de l'eau pour faire une pulpe, procédés en voie sèche ou ces mêmes matières premières sont agglomérées en granules grâce à l'ajout de plus faible quantité d'eau et la voie sèche. C'est cette dernière technique que nous allons présenter car elle de loin la plus développée à l'heure actuelle. Elle a pour avantage de minimiser la consommation d'énergie et de d'économiser l'eau (Mathieu 2006).



**Figure I-2:** Les différents ateliers de la fabrication du ciment.

Les étapes de la voie sèche sont classées comme suit :

- L'extraction : les matières premières sont extraites de carrières à ciel ouvert par abattage ou ripage.
- Le concassage : les matériaux passent dans un concasseur pour les réduire à une taille inférieure à 80 mm.
- La pré-homogénéisation : les matériaux sont disposés en couches horizontales superposées dans un hall puis repris verticalement pour obtenir un mélange homogène.
- Le séchage et le broyage : les matières premières sont séchées et broyées finement dans des broyeurs à boulets ou des broyeurs à meules verticaux.

- La cuisson : à fin d'obtention du clinker, elle se fait dans un four rotatif dont la température avoisine les 1450 ° C. Sous l'effet de la chaleur, la farine se transforme en clinker.
- Du clinker au ciment : pour obtenir un ciment aux propriétés hydrauliques actives, le clinker doit être également broyé très finement dans des broyeurs à boulets. C'est pendant le broyage que l'on ajoute le gypse, indispensable à la régulation de la prise du ciment. On obtient alors le ciment Portland (**Mathieu 2006**).

### I.2.3. Impact de la fabrication du ciment sur l'environnement

Les impacts négatifs de la fabrication de ciment sont liés à la manipulation et à l'entreposage des matériaux, à leur broyage (particules) et au fonctionnement des fours et des dispositifs de refroidissement du clinker c'est-à-dire les poussières de four et les gaz de combustion contenant du monoxyde et du dioxyde de carbone, des hydrocarbures, des aldéhydes, des cétones, des oxydes de soufre et de l'azote et d'autre gaz (tableau I-1). Les rejets de charges des fours (pH élevé, matières en suspension, solides dissous, principalement du potassium et des sulfates) et les eaux de refroidissement sont des sources de pollution de l'eau (**Boad 2018**). D'une manière plus détaillée les impacts sont classés comme suit :

- **Émissions de Gaz à effet de serre** : la transformation du calcaire et de l'argile dans des fours puissants, la chaleur qui en résulte dégage d'importantes quantités de fumée de (Figure I-3) monoxyde (CO) et du dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>), des hydrocarbures, des aldéhydes, des cétones, des oxydes de soufre (SO<sub>2</sub>) et de dioxyde d'azote (NO<sub>2</sub>)

**Tableau I-1:** les principales substances émises dans l'air (en kg) pour la production de 1 kg de ciment portland (**ATILH et al. 2002**).

Chemical Compound	Air emission (kg/ kg cement)
<b>Chlorine (Cl)</b>	$2.9 \times 10^{-6}$
<b>Hydrochloric acid (HCl)</b>	$8.8 \times 10^{-6}$
<b>Carbone monoxide (CO)</b>	$3.3 \times 10^{-6}$
<b>Carbone Dioxide (CO<sub>2</sub>)</b>	$6.9 \times 10^{-1}$
<b>Mercury and derivates (Hg)</b>	$3.4 \times 10^{-8}$
<b>Nitrous oxide (Nox)</b>	$1.2 \times 10^{-3}$
<b>Copper and derivates (Cu)</b>	$2.8 \times 10^{-7}$
<b>Zinc (Zn)</b>	$9.8 \times 10^{-9}$
<b>Nickel and derivates (Ni)</b>	$1.6 \times 10^{-7}$
<b>Cobalt (Co)</b>	$1.4 \times 10^{-8}$



**Figure I-3:** Fumée dégagée des cimenteries.

- **Émissions de particules dans l'atmosphère :** en terme spécifique lors du transport de matériaux poussiéreux ou pulvérisés entre l'extraction du calcaire et le chargement et la livraison du produit fini. Les émissions de particules constituent la principale source d'effets négatifs sur l'environnement.
- **Épuisement des ressources naturelles non renouvelable :** les ressources comme le calcaire et de l'argile, leur extraction se fait par abattage ou ripage. Les carrières sont laissées ouvertes par la suite.
- **Rejets de déchets liquides :** les eaux utilisées dans la phase de refroidissement sont chargées l'alcali et elles se sont débarrassées dans certaines usines d'une manière inappropriée.
- **Consommation énergétique :** la production du clinker nécessite une température qui peut atteindre jusqu'à 1500 C, ceci participe au réchauffement climatique.

#### **I.2.4. La substitution du ciment par un autre matériau dans la confection du béton**

Les conceptions les plus écologiques sont devenues très présentes dans le domaine de génie civil et d'une manière plus précise dans le domaine des matériaux de construction ; on a vu apparaître ces dernières années des termes comme : éco-matériau, béton vert, etc.

Les années précédentes on a connu plusieurs tentatives de remplacer le ciment Portland classique complètement ou partiellement, mais ça reste le produit le plus utilisé dans le monde. Le ciment est indispensable mais en même temps dénié dans le débat sur le climat (Winnefeld et al. 2022).

Parmi les matériaux potentiels pour substituer le ciment dans la confection des différents mélanges de ciment, mortier ou même béton c'est les cendres de bois le thème de notre recherche.

### I.3. Les cendre de bois

#### I.3.1. Définition

La cendre est un résidu principalement basique de la combustion, de l'incinération, de la pyrolyse de diverses matières organiques et minérales, et par extension de produits tels que le charbon, le lignite, le coke ou de divers déchets brûlés dans les incinérateurs, en plein air ou dans les cheminées ou fours (**Boulday et Marcovecchio 2016**).

La composition des débris pulvérulents nommés cendres (figure I-4) varie selon de nombreux paramètres, qui sont essentiellement les espèces végétales brûlées, les parties des plantes (écorce, tronc, ou jeunes branches avec feuillage par exemple), la nature du sol, ainsi que la période de l'année durant laquelle ces plantes ont été récoltées. Les cendres obtenues selon le foyer ou le mode de combustion se distinguent fortement (**Bouvot 2001**).



**Figure I-4:** Cendres de bois.

#### I.3.2. Caractéristiques chimiques et minéralogiques des cendres de bois

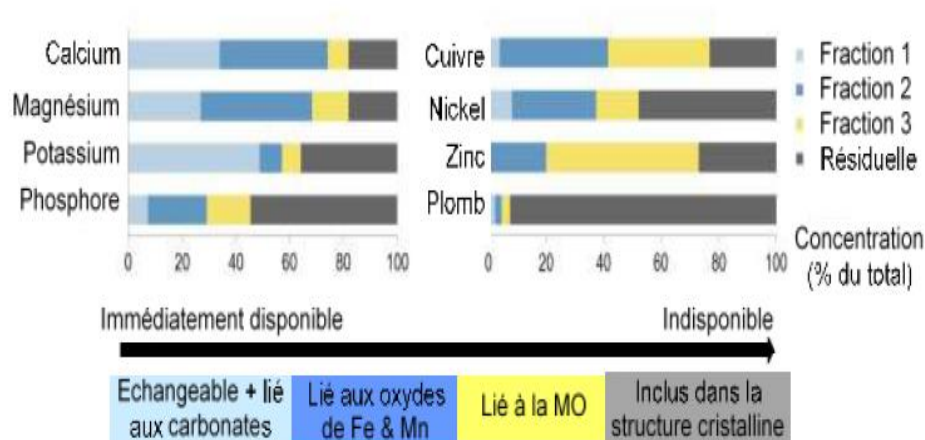
Les cendres de bois contiennent une quantité considérable de calcium (entre 20 et 50% sous forme d'oxyde de calcium, c'est-à-dire de chaux) et sont généralement riches en potasse alors que celles d'herbes, en particulier de graminées, ou simplement de paille, sont riches en silice. La coloration des cendres (la couleur grisâtre) est assurée par des proportions de minéraux comme l'oxyde de fer, de manganèse.

Les cendres issues de bois calciné présentent un PH très alcalin, qui est à mettre en relation avec leur teneur élevée en Ca et Mg (tableau I-2). Dans ces cendres, le Ca se présente majoritairement sous forme de carbonate [(calcite:  $\text{CaCO}_3$ )] et d'hydroxyle [portlandite:  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ] (**Sinaj et al. 2013**).

**Tableau I-2:** Teneurs totales en macro- et microéléments dans les cendres de bois selon la littérature. Les valeurs entre parenthèses représentent le coefficient de variation (**Maltas et Sinaj 2014**).

Eléments	Pourcentage
PH-H <sub>2</sub> O	13,2(1%)
<b>Macroéléments (g/kg MS)</b>	
Calcium (Ca)	281,3 (2 %)
Potassium (K)	67,4 (9 %)
Magnésium (Mg)	16,5 (5 %)
Phosphore (P)	9,2 (9 %)
Azote (N)	0,07 (27 %)
<b>Microéléments (mg/kg MS)</b>	
Aluminium (Al)	17 300 (7 %)
Fer (Fe)	12 175 (3 %)
Manganèse (Mn)	7550 (7 %)
Bore (B)	147 (12 %)
Chrome (Cr)	123 (17 %)
Vanadium (V)	22 (12 %)
Cobalt (Co)	9 (168 %)
Molybdène (Mo)	1,1 (7 %)

La plupart des macroéléments cationiques (Ca, K et Mg) se trouvent dans les cendres provenant de bois naturel sous une forme facilement disponible (figure I-5). Le P se trouve majoritairement sous une forme peu disponible, probablement associé au Ca sous forme de phosphate de calcium du type tricalcique, qui se forme toujours à haute température lors de la combustion du bois.



**Figure I-5:** Spéciation des macroéléments selon la méthode d'extractions séquentielles.

### I.3.3. Provenance des cendres de bois

Les cendres de biomasse sont des résidus générés principalement durant l'incinération des chutes de bois, ce déchet naturel peut être collecté de plusieurs ressources :

- **Cendres domestiques** : issues généralement des cheminées traditionnelles et des chauffages au bois (figure I-6)



**Figure I-6:** Cendres de foyer.

- **Cendres de charbon** : la fabrication du charbon végétal produit une quantité importante de cendres de biomasse, à la fin du processus de fabrication du charbon on peut trouver une quantité importante de cendres générée durant la combustion du bois. Ce déchet est généralement négligé et n'a aucune utilisation spécifique.

- **Cendres des installations de gazéification ou de pyrogazéification** : ces cendres représentent un déchet résiduel après la production de la chaleur ou de l'électricité ou un gaz de synthèse injectable dans les réseaux de gaz existants. Ce processus s'appuie sur les procédés de pyrolyse et de gazéification qui imitent en accéléré le procédé à l'origine de la formation des énergies fossiles.

- **Cendre des champs d'agriculture** : après la fin de chaque saison de récolte, le reste des feuilles, branches et autres sont collectés et brûlés pour préparer l'arrivée de la saison qui suit (figure I-7). Les cendres qui en résultent peuvent aussi être valorisées.



**Figure I-7:** Cendres issues des déchets d'agriculture (Skikda).

#### **I.3.4. Variabilité des cendres de bois**

Les caractéristiques chimiques et minéralogiques ainsi que la couleur des cendres dépendent de plusieurs facteurs comme :

- Type de cendres (fond ou volante)
- Type de chaudière
- Qualité et températures de combustion
- Origine du combustible : les cendres végétales peuvent avoir plusieurs sources potentielles comme l'exploitation forestière, industrie de première transformation, industrie de seconde transformation (coupeaux, sciure et déchets de bois), pellets bois de rebut, bois de parc à conteneur, sous-produits de papeterie, entretien d'espace vert. (Martin 2015).

#### **I.3.5. Utilisations usuelles et antiques des cendres de bois**

##### **I.3.5. 1. Engrais et amendement**

Les cendres sont depuis le Néolithique utilisées comme engrais pour leurs richesses en calcium, en magnésium, en potassium et en phosphore. Ainsi, les aménagistes forestiers de quelques pays européens sont fortement encouragés à utiliser la cendre de bois comme amendement de sol afin de combler la perte d'éléments nutritifs lors de la récolte du bois et de la biomasse ; dans le but de lutter contre les effets du dépôt atmosphérique sur l'acidité des sols ; ainsi que pour accroître la fertilité des sols et la productivité forestière (Hannam et al. 2016).

Les cendres de biomasse ne doivent être incorporées au sol ou au compost au printemps, en fonction des besoins du sol et des cultures qui y seront établies. Une analyse de sol peut être effectuée en laboratoire afin de déterminer les amendements à y effectuer, sous forme d'engrais, de chaux agricole ou de cendres.



**Figure I-8:** Utilisation des cendres de bois comme engrais.

### **I.3.5. 2. Lessive**

Les cendres contiennent de la potasse, c'est pourquoi elles peuvent être utilisées pour fabriquer une lessive biodégradable. L'engouement pour les produits bio a suscité un regain d'intérêt pour la lessive à la cendre de bois. Le mot « lessive » vient d'ailleurs du latin *lixivia* qui désignait la solution à base de cendre servant à laver le linge. La lessive à la cendre de bois a pour avantage d'être totalement gratuite, très simple à fabriquer, écologique et tout aussi efficace qu'une lessive standard (**Lecrenais 2016**).

### **I.3.5. 3. Déverglaçage des chaussées**

Le déverglaçage représente le processus d'enlever le verglas d'un revêtement de sol ou d'une chaussée, les cendres de biomasse ont remplacé le sel dans certaine région du monde pour l'exécution de cette opération. Ce remplacement peut être possible grâce à la contenance élevée des cendres en potassium.

### **I.3.5.4. Amélioration des sols**

La stabilité de la structure dépend du sol. Cette stabilité est améliorée dans le sol par la présence de cations bivalent comme le calcium. Dans les sols acides, le lessivage du calcium n'est pas compensé par la minéralisation de la roche mère (contrairement aux sols calcaires). Cette perte nette entraîne une acidification du milieu et une saturation en ions  $H^+$ . L'apport de cendres permet de compenser la perte de calcium et de redresser le pH du sol (au même titre que de la chaux). L'ensemble des pertes peut atteindre 200 à 800 kg/an de  $CaO$  et 10 à 60 kg/ha de  $MgO$ . Les pertes les plus importantes ont lieu sur les sols à textures grossières, acide et filtrant (**Couturier et Brassat 2005**).

### I.3.6. D'autres types de cendres végétales valorisées dans le ciment

#### I.3.6. 1. Cendres de balles de riz

La balle de riz (figure I-9) est un sous-produit dérivé du décorticage du riz de couleur brun-beige, de consistance dure. Après une combustion complète de ces balles, on obtient de la RHA (Rice Husk Ash), des cendres de couleur grisâtre. La cendre de balle de riz possède une teneur élevée en silice, d'autant plus élevée que la combustion est complète et qu'elle se fait à haute température. La RHA possède de bonnes propriétés pouzzolaniques. Elle se présente sous forme « amorphe ». Elle s'obtient au travers d'une combustion contrôlée à haute température, et se présente sous une forme très fine, ce qui les rend très actives (Delot 2014).



Figure I-9: Balles de riz.

#### I.3.6. 2. Cendres de grignon d'olive

Les grignons d'olive (figure I-10) représentent un sous-produit du processus d'extraction de l'huile d'olive, ce résidu est composé des peaux, de pulpe et des fragments des noyaux. Ils sont obtenus par des moyens strictement mécaniques excluant tout adjuvant, ce sont des produits plus ou moins pâteux.

Plusieurs études à travers le monde ont été consacrées à évaluer l'effet de l'incorporation des grignons d'olive dans les mélanges du mortier et du béton et spécialement dans les pays de la méditerranée ou la production d'olive et considérable.



Figure I-10: Grignon d'olive.

### I.3.6. 3.Cendres de cannes à sucre

La canne à sucre (figure I-11) est une plante cultivée appartenant au genre *Saccharum*, cultivée principalement pour la production du sucre.

La bagasse est le résidu fibreux de la transformation des cannes en sucre. Des ingénieurs de l'Université Fédérale de Rio de Janeiro ont mis au point un béton écologique avec une substitution qui varie de 20 % à 40 % de ciment par les cendres de bagasse de cannes à sucre, un matériau largement produit en Amérique Latine et les résultats ont été prometteurs.



**Figure I-11:** Bagasse de canne à sucre.

### I.3.7. Avantage de la substitution du ciment par les cendres

La substitution du ciment par les cendres de biomasse dans la confection du mortier et du béton peut avoir plusieurs avantages comme :

#### a. Avantages économiques

Le ciment Portland est le composant le plus coûteux d'un mélange de béton, car il nécessite un processus de fabrication long, complexe et consomme de l'énergie. Remplacer un pourcentage de ciment avec un déchet ou un sous-produit peut être absolument bénéfique.

#### b. Avantages écologiques

La production d'une tonne de ciment Portland libère dans l'atmosphère une quantité importante de gaz carbonique ( $\text{CO}_2$ ). Donc, le remplacement du ciment Portland par des déchets et des sous-produits contribue à la décroissance d'autant des émissions de dioxyde de carbone et d'autres gaz à effet de serre.

#### c. Avantages techniques

La substitution partielle du ciment par les fines de cendres peut avoir une influence favorable sur les propriétés des mélanges de mortier et du béton à l'état frais ainsi qu'à l'état durci, cela va être traité d'une manière approfondie dans les chapitres qui suivent.

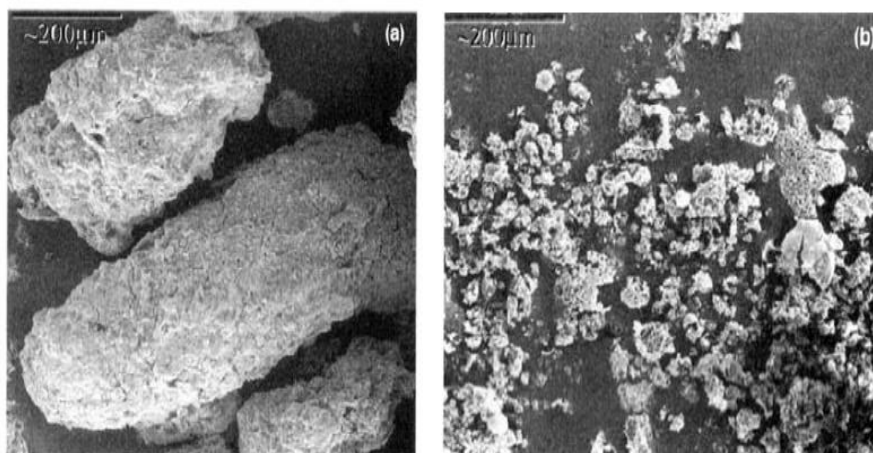
#### I.4. Valorisation des cendres de bois dans les matériaux de construction

Le domaine de génie civil représente la meilleure valorisation possible des cendres de bois, c'est pour cette raison que plusieurs scientifiques à travers le monde ont essayé d'introduire ce déchet dans le ciment en suivant de multiples axes de recherche.

En effet **Dhakulkar et Malkhede (2018)**, ont affirmé que les analyses chimiques des cendres montrent une quantité considérable de silice ( $\text{SiO}_2$ ), ce qui rend la substitution du ciment par ces résidus possible. Dans leur partie expérimentale ils ont remplacé le ciment avec les cendres issues d'incinération de la sciure de bois dans de béton avec des taux variables de 5%, 10%, 15%, 20% et 25% ; leurs résultats montrent que la résistance à la compression, la résistance à la traction et la résistance à la flexion ont augmenté à 15% puis commence à diminuer à 20% et 25% de remplacement du ciment par de la cendre de bois. Ils ont donc conclu que l'association ciment et cendres de bois a des effets positifs sur la résistance du béton.

Selon **Chowdhury et al. (2015)** les analyses chimiques et la diffractométrie aux rayons X ont montré que les cendres de bois contiennent une quantité considérable de silice amorphe donc la substitution du ciment par ce résidu ne va pas nuire aux propriétés de résistance du béton, en effet leur enquête a montré des résultats prometteurs et réponds aux exigences environnementales.

La qualité et la quantité des cendres de bois produisent, suivant **Swaptik et al. (2015)**, dépendent de certains facteurs comme la température de combustion, les types et l'hydrodynamique du four et les espèces d'arbres incinérées. Les températures de combustion des déchets de bois influencent à la fois le rendement et la composition chimique de la cendre de bois. Selon ces scientifiques la combustion du bois et ses déchets à des températures supérieures à  $500^\circ\text{C}$  entraînent une réduction de cendres jusqu'à 45 %, une décomposition des carbonates, diminue l'alcalinité des cendres ainsi que l'abondance de composés oxydés tels que la chaux vive ( $\text{CaO}$ ), dans la phase chimique de cendre (figure I-12).



**Figure I-12:** Analyse par microscopie à balayage (MEB) d'un échantillon de cendre de bois (**Swaptik et al, 2015**).

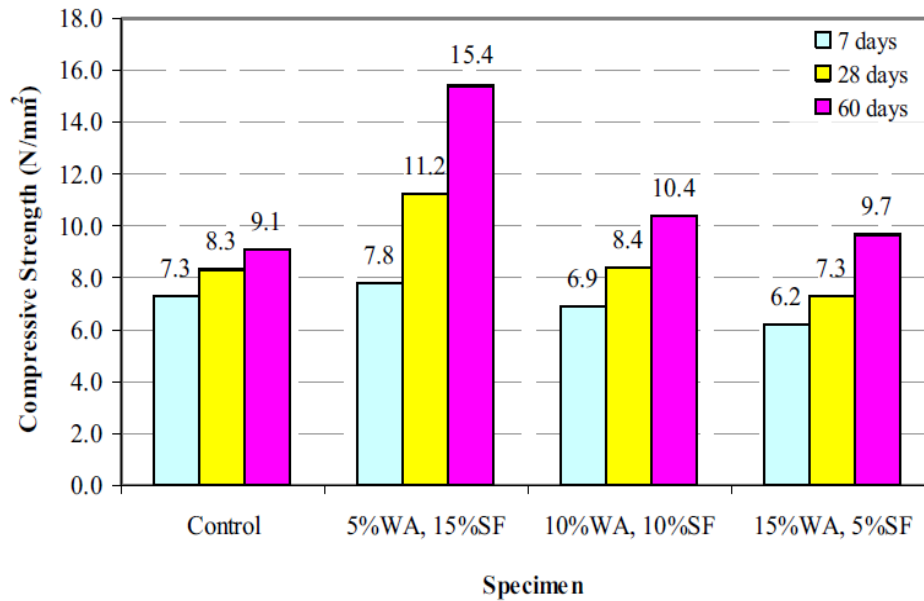
L'utilisation massive et incontrôlée de ressources naturelles non renouvelables dans la production de béton structurel utilisé dans les infrastructures a poussé **Fapohunda et al. (2018)** à trouver d'autres ressources de matériaux alternatifs comme les déchets de bois. Ces chercheurs ont évalué les propriétés et le comportement structurel d'un béton contenant des déchets de biomasse sous forme de cendres de sciure de bois. La partie expérimentale est exécutée en remplaçant partiellement le ciment avec de la sciure de bois, ainsi qu'en remplaçant partiellement des agrégats fins avec des granulats de bois. Les résultats de l'examen ont montré que les mélanges de béton obtenus répondent aux exigences voulues à condition que le remplacement ne soit pas supérieur à 20 %.

Dans l'étude publiée par **Mambou et al. (2019)**, ils ont constaté que la consistance des mélanges augmente au fur et à mesure avec l'augmentation des taux de substitution pendant le gâchage, et par conséquent on obtient une augmentation remarquable en quantité d'eau nécessaire à fin d'obtenir un mortier malléable. Dans le même travail, ces chercheurs ont noté que les temps de début et de fin de prise augmentent constamment avec l'augmentation des taux de substitution du ciment par les cendres de bois. Leurs résultats ont aussi montré que l'introduction des cendres de bois améliore la résistance aux attaques de l'acide chlorhydrique (5% HCL).

Basé sur la partie expérimentale de **Elangovan et al. (2018)** où ils ont remplacé 10%, 20% et 30% du poids du ciment par des cendres de bois, les résultats indiquent qu'après 7 et 28 jours le mortier avec 10% de cendre marque des résistances à la compression qui dépassent les autres pourcentages et entrent dans l'intervalle de 23 à 26 MPa.

L'étude publiée par **Salvo et al. (2015)** s'articule autour de la valorisation des cendres de biomasse issues des chaufferies des centrales électriques en tant que matériau supplémentaire dans l'industrie du ciment ; l'utilisation de ces résidus fut après un traitement de désalcalinisation afin de réduire la teneur en alcali. Ces chercheurs ont trouvé que les résistances mécaniques des mortiers à base de cendres étaient supérieures à celle du mortier témoin, ils ont donc affirmé que les cendres de biomasse après un traitement approprié, présente une activité pouzzolanique et hydraulité latente qui pourrait être utilisée pour la fabrication d'un béton à faible énergie intrinsèque ce qui est très prometteur.

Les chercheurs **Othuman et al. (2014)**, ont étudié la possibilité de remplacer 5%, 10% et 15% du ciment par une combinaison cendres de bois-fumée de silice, les résultats ont montré des améliorations à l'échelle microstructurale et par conséquent des améliorations de certain résistances mécaniques (figure I-13). Ces chercheurs ont aussi constaté que cette substitution prolonge considérablement les temps de début et de fin de prise des mélanges.

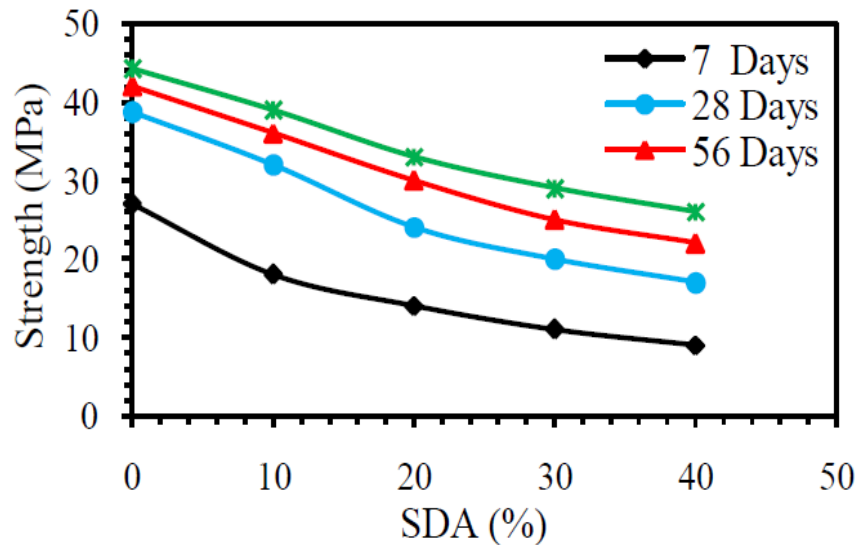


**Figure I-13:** Influence de la substitution partielle du ciment par la combinaison ciment-fumée de silice sur la résistance à la compression du mortier suivant **Othuman et al. (2014)**.

Dans l'étude publiée par **Viet-Anh et al. (2019)** les résultats du remplacement partiel du ciment par les cendres de biomasse (avec les taux de 10%, 20%, 30%, 40% et 50%) dans la confection des panneaux, montrent que la demande en eau pendant le gâchage augmente proportionnellement avec la teneur de cendre. D'une autre part ils ont constaté que les cendres confèrent aux mélanges une perte au feu et une conductivité thermique relativement inférieure par rapport au mélange témoin.

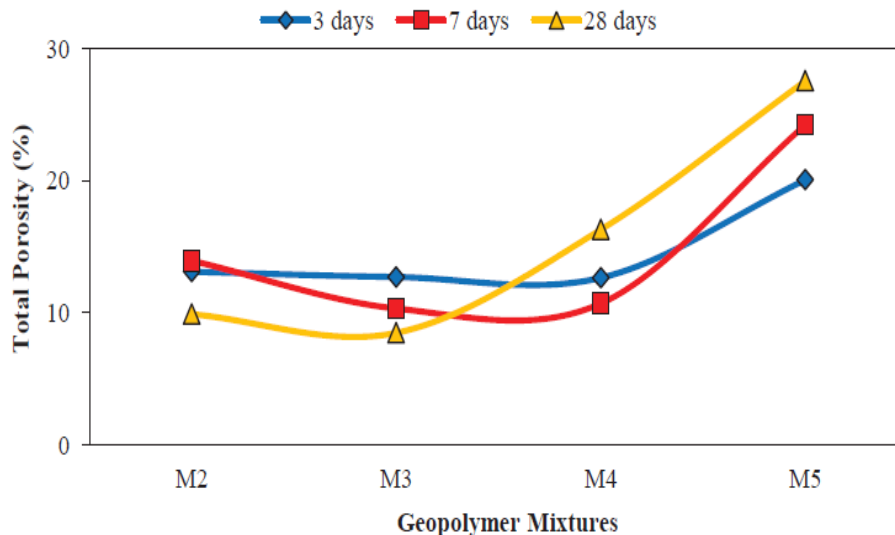
Dans l'étude publiée par **Ban et Ramli (2011)**, ou ils ont substitué des pourcentages variables de ciment par des cendres de bois à haute teneur en calcium dans des mélanges de béton et de mortier. Les cendres de bois à haute teneur en calcium est un sous-produit acquis à partir d'une unité de chaudière entièrement automatique à l'échelle industrielle (connue commercialement sous le nom de chaudière Bio-Turbomax) utilisée dans l'industrie de fabrication de produits en bois de caoutchouc. Leurs résultats ont indiqué une amélioration de la résistance à la compression et à la flexion ainsi qu'une amélioration significative de la

L'article publié par **Marthong (2012)** a mis en question la possibilité d'utiliser les cendres de sciure de bois comme matériau de construction, la sciure a été brûlée et les cendres ont été tamisées à l'aide d'un tamis de 90 microns. Une étude comparative sur les propriétés du béton témoin sans ajouts et avec des taux de cendres de sciure de bois comme suit respectivement : 10, 20, 30 et 40%. Les résultats des tests montrent que l'inclusion de ces cendres provoque une faible expansion en raison de leur faible teneur en calcium. Le développement précoce de la résistance a été observé à environ 50-60% de leur résistance à 28 jours (figure I-14). Enfin l'étude suggère l'utilisation des cendres de sciure de bois comme remplacement partiel du ciment jusqu'à un pourcentage maximum de 10% par volume dans toutes les catégories de ciment.



**Figure I-14:** Influence de la substitution partielle du ciment par les cendres de sciure de bois sur la résistance à la compression du béton suivant **Marthong (2012)**.

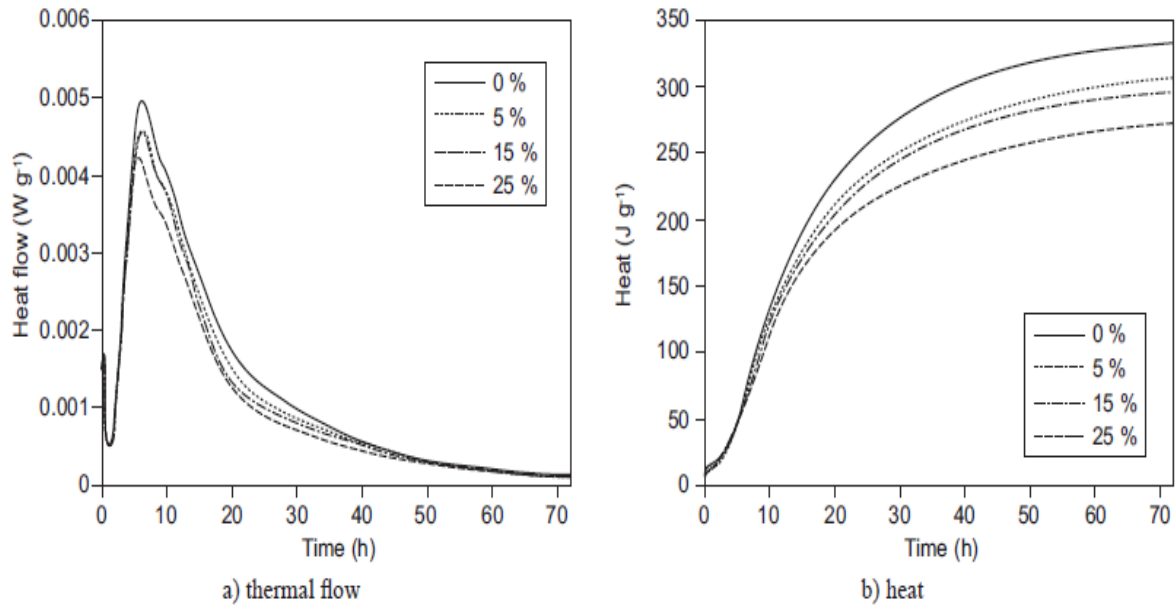
L'enquête menée par **Abdulkareem et al. (2018)** à propos de l'inclusion des cendres de bois (biomasse) comme matériau de remplacement partiel des cendres volantes dans le mortier de géopolymère avec trois taux de substitution sont 5%, 15% et 25% de la masse du liant. Les résultats montrent que l'inclusion de cendres de biomasse jusqu'à 15% a entraîné une résistance plus élevée avec des caractéristiques de durabilité plus élevée que le mélange témoin à l'âge de 3 et 7 jours. Cependant, à l'âge de 28 jours, le géopolymère contenant 10% de cendre de bois était le seul mélange mélangé présentant une résistance à la compression plus élevée et une porosité totale inférieure à celle du mélange témoin (figure I-15).



**Figure I-15:** Effet de la substitution partielle des cendres volantes par les cendres de bois sur la porosité du mortier géopolymère selon **Abdulkareem et al. (2018)**.

L'enquête menée par **Kaminskas et Cesnauskas (2014)** a étudié la possibilité d'utiliser les cendres de biomasse volantes provenant d'une centrale à biomasse (coupeaux et déchets de bois) d'une usine en Lituanie comme additif pour le ciment Portland ordinaire. Cette

valorisation s'est effectuée avec des pourcentages variables de 5 %, 10 %, 15 % et 25 % du poids du ciment. Les chercheurs ont affirmé que ce type de cendre a une faible activité cela avait un effet négatif sur les propriétés de résistance du ciment. Une partie de cette étude été consacré à évaluer l'influence de l'additif cendres de biomasse volantes sur l'hydratation initiale du ciment, une mesure de l'évolution thermique pendant le processus d'hydratation par analyse calorimétrique (figure I-16).



**Figure I-16:** Courbes calorimétriques du flux thermique (a) et de la chaleur (b) des échantillons de ciment avec et sans cendres de biomasses volantes suivant **Kaminskas et Cesnauskas (2014)**.

La valeur maximale du flux thermique est notée pour l'échantillon avec 15 % de cendres de biomasse volantes, ces scientifiques ont donc supposé que cet additif accélère de manière significative l'hydratation initiale du ciment.

## 1.5. Conclusion

Le ciment est un matériau de construction largement utilisé dans le monde grâce à ses performances comme la résistance et la durabilité mais comme on a vu auparavant ses processus de fabrication sont complexes, coûteux et nocifs pour l'environnement. Ces préoccupations ont poussé plusieurs scientifiques à travers le monde à étudier la faisabilité de la substitution partielle des déchets et des sous-produits et d'une manière précise les cendres de biomasse.

En observant les résultats trouvés par les scientifiques on peut conclure que la voie de valorisation des cendres de biomasse dans le ciment est intéressantes et très prometteuse.

## **CHAPITRE II : CARACTERISATION DES MATERIAUX**

## II. Caractérisation des matériaux

### II.1. Introduction

Les performances du mortier et du béton dépendent des caractéristiques physico-chimiques et mécaniques des éléments constitutifs. Ces derniers doivent être caractérisés au préalable selon des normes en vigueur.

A cet effet, on présente au cours de ce chapitre la caractérisation des matériaux utilisés pour réaliser les différents essais expérimentaux de notre programme de recherche, à savoir : le ciment, les cendres de bois, les granulats et l'eau de gâchage et l'adjuvant.

Les essais de caractérisation ont été réalisés au sein des laboratoires suivants :

- Laboratoire de génie civil de l'université 20 août 1955 Skikda ;
- Laboratoire de l'habitat et la construction – Skikda ;
- Laboratoire de la cimenterie de Hdjar Soud – Skikda.

### II.2. Caractérisation des matériaux

#### II.2.1. Matériaux utilisés pour le mortier

Les différents matériaux utilisés dans cette étude sont :

- Un sable de dune de classe 0/1 d'origine Oued Zhor-Skikda.
- Ciment CEM I 42.5 provenant de la cimenterie de Msila.
- Cendres de bois (résidus récupérés après la confection du charbon végétal).
- L'eau de gâchage du robinet.

##### II.2.1.1. Le ciment

Le ciment utilisé pour effectuer cette étude et pour l'ensemble des compositions du mortier, est un ciment portland de type CEM I de classe 42,5 conforme à la norme algérienne **NA 442** résistants aux sulfates (figure II-1), provenant de la cimenterie Msila (Algérie).



**Figure II-1:** CEM I de la cimenterie de Msila.

Les essais effectués sur les constituants du CEM I sont :

- La densité est de  $2,900 \text{ g/cm}^3$ , déterminée à l'aide du densimètre de Chatelier, en utilisant l'acétone (figure II-2)



**Figure II-2:** Mesure de la densité.

- La surface spécifique de Blaine est de  $3695 \text{ cm}^2/\text{g}$ , déterminée conformément à la norme **EN 196-6** par le perméabilimètre automatique de Blaine (figure II-3), cet essai consiste à observer le temps mis par une quantité d'air pour traverser un échantillon de ciment ou de fillers compact dans la cellule de l'appareil. Plus la surface spécifique de la poudre est importante et plus le temps mis par l'air pour traverser la poudre est long.



**Figure II-3:** Mesure de la surface spécifique de Blaine.

- La perte au feu est de  $1,2 \%$ , déterminée selon la norme **EN 197-1**, cet essai est effectué par calcination d'un échantillon de ciment ( $1,00 \pm 0,05 \text{ g}$ ) à une température d'environ  $1000^\circ\text{C}$ , qu'il faut mettre dans un récipient et laisser dans un four à calcination (figure II-4) pendant 20 min. Après son refroidissement, à température ambiante, on pèse sa masse à nouveau.



**Figure II-4:** Essai perte au feu.

- L'analyse chimique (EN 197-1) se fait par diffraction par rayon «X» et par la méthode classique. Les caractéristiques chimiques et minéralogiques sont présentées dans le tableau II-1, la teneur des phases anhydres du ciment est calculée à partir de l'analyse du ciment en appliquant la méthode de Bogue.

**Tableau II-1:** Composition chimique et minéralogique du ciment.

Composants	Résultats (%)	Composants	Résultats (%)
CaO	62,85	Cl-	0.017
AL <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,02	SO <sub>3</sub>	2,04
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,14	C <sub>3</sub> S	61.00
SiO <sub>2</sub>	21,01	C <sub>2</sub> S	14.50
MgO	1,85	C <sub>3</sub> A	2.40
Na <sub>2</sub> O	0.11	C <sub>4</sub> AF	15.22
K <sub>2</sub> O	0,45	--	--

### II.2.1.2. Les cendres de bois

Pour réaliser notre travail on a utilisé l'ajout cendres de bois (figure II-5), ce déchet est collecté à la fin de la fabrication du charbon végétal. Le processus de fabrication du charbon génère une quantité considérable de cette matière pulvérulente.

Les cendres de bois se présentent sous la forme d'une poudre fine de couleur grisâtre similaire à l'aspect visuel du ciment. Aucun traitement préalable n'a été effectué à l'exception d'un léger tamisage pour qu'on puisse s'en débarrasser des parties non-incinérées.

-Les cendres de biomasse ont une masse volumique absolue de 2,300 g/cm<sup>3</sup>, une surface spécifique de Blaine de 2528 cm<sup>2</sup>/g et une perte au feu de 18,60 %.



**Figure II-5 :** Cendres de bois.

La composition chimique des cendres de bois est présentée dans le (tableau II-2)

**Tableau II-2:** Composition chimique des cendres de bois.

Composants	Résultat (%)	Composants	Résultat (%)
CaO	33.93	SiO <sub>2</sub>	21.00
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.26	MgO	1.44
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.21	Na <sub>2</sub> O	0.48

Les analyses chimiques montrent que les composants chimiques principaux des cendres de bois sont : SiO<sub>2</sub>, CaO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO et Na<sub>2</sub>O qui sont les mêmes du ciment avec des pourcentages qui s'approchent.

### II.2.1.3. Le sable de dune

Pour la confection des mortiers on a utilisé un sable de dune de classe 0/1 d'origine Oued Zhor-Skikda (figure II-6), Ses propriétés physiques sont représentées dans le tableau II-3.

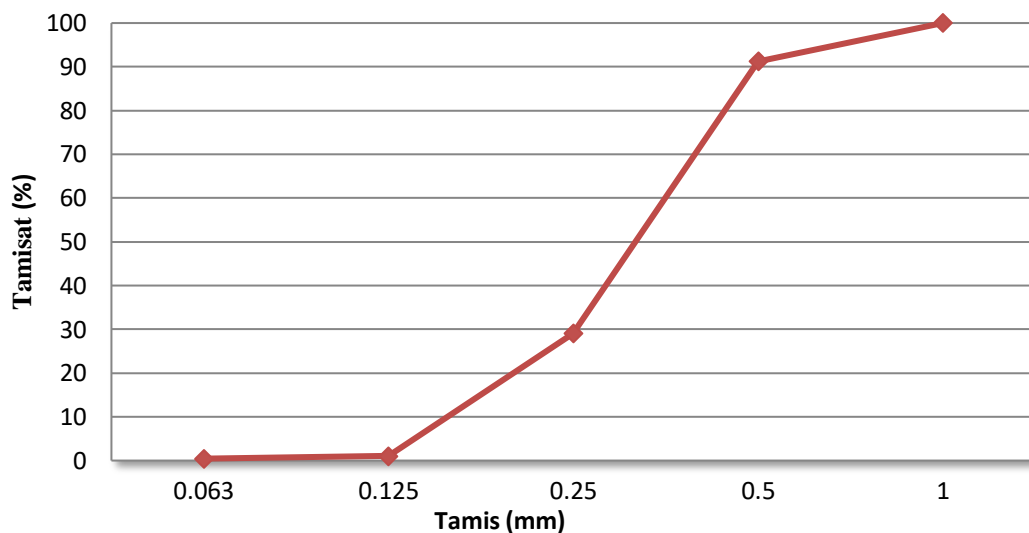


**Figure II-6:** Sable de dune d'Oued Zhor.

**Tableau II-3:** Propriétés physiques de sable de dune.

Caractéristiques	Résultat (%)
Masse volumique apparente (g/cm <sup>3</sup> )	1,53
Masse volumique absolue (g/cm <sup>3</sup> )	2.60
Equivalent de sable (propreté) (%)	83,25
Absorption d'eau (%)	1.25
Module de finesse $M_f$	1, 78
Valeur au bleu de méthylène VB	0.6

Le sable de dune présente des densités courantes, propre de faible pourcentage de fines argileuses, à un module de finesse de **1,78** donc notre sable est à majorité de grains fins. Son analyse granulométrique est représentée par la (figure II-7).

**Figure II-7:** Courbe d'analyse granulométrique du sable.

Le résultat d'analyse granulaire (figure II-7) est courant, la granulométrie de ce sable est continue.

#### II.2.1.4. Eau de gâchage

L'eau de gâchage utilisée est une eau potable fournie du robinet de laboratoire de génie civil, l'eau utilisée pour la confection du mortier et du béton ne doit pas contenir une quantité excessive de matières organiques, acides, sels, matières sucrées, etc....

**Tableau II-4:** Analyse chimique de l'eau.

Cl Mg/l	PH	T°	Salinité	TDS Mg/l	Conducti vité Us/cm	Observation
0,1	7,3	28	0,2	297	541	Turbidité : 1,44ntu Eau de bonne qualité chimique

L'analyse chimique représentée dans le tableau II-4 montre que les résultats répondent à toutes les prescriptions de la norme **EN 1008**.

### II.2.2. Matériaux utilisés pour le béton

Les matériaux utilisés dans cette partie de recherche sont :

- Ciment CPJ-CEM II 42.5 (S-L) provenant de la cimenterie de Hdjar soud- Skikda (Algérie).
- Cendres de bois récupérées des champs agricoles.
- Un sable de carrière de classe 0/4 d'origine El-ghedir-Skikda (Algérie).
- Un gravier de carrière de classe 4/8 d'origine El-ghedir-Skikda (Algérie).
- Un gravier de carrière de classe 8/16 d'origine El-ghedir-Skikda (Algérie).
- Un gravier de carrière de classe 16/22,4 d'origine El-ghedir-Skikda (Algérie).
- Un adjuvant superplastifiant haut réducteur d'eau (POLY FLOW SR 5400).
- Eau de gâchage du robinet.

#### II.2.2.1. Ciment

Le ciment pour la réalisation de notre partie expérimentale est un CEM II de classe 42.5 provenant de la cimenterie de Hdjar soud- Skikda, ses caractéristiques physico-chimiques sont présentées sur le tableau II-5.

**Tableau II-5:** Propriétés physico-chimiques du ciment.

Désignations	Résultat	Désignations	Résultat
Masse volumique absolue g/cm <sup>3</sup>	3.1	K <sub>2</sub> O %	0.57
SSB Cm <sup>2</sup> /g	3500	Cl %	0.01
CaO %	66.46	SO <sub>3</sub> %	0.46
AL <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	5.40	PAF %	7.5
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	3.92	C <sub>3</sub> S %	62.18
SiO <sub>2</sub> %	21.63	C <sub>2</sub> S %	15.13
MgO %	1.29	C <sub>3</sub> A %	7.68
Na <sub>2</sub> O %	0.21	C <sub>4</sub> AF %	11.23

### II.2.2.2. Cendres de bois

Les cendres utilisées dans cette partie ont été récupérées des champs d'agriculture, après la fin de chaque saison de récolte, le reste des feuilles, branches et autres sont collectés et brûlés pour préparer l'arrivée de la saison qui suit.

Les cendres de bois valorisées se présentent sous la forme d'une poudre fine de couleur grisâtre similaire à l'aspect visuel du ciment. Aucun traitement préalable n'a été effectué à l'exception d'un léger tamisage pour qu'on puisse s'en débarrasser des parties non-incinérées en utilisant le tamis 400 micron.

L'ajout cendre à une masse volumique absolue de  $2,300 \text{ g/cm}^3$ , une surface spécifique de Blaine de  $4244 \text{ cm}^2/\text{g}$  et une perte au feu de 40 %.

L'analyse chimique des cendres de bois est présentée dans le (tableau II-6)

**Tableau II-6:** Propriétés chimiques des cendres de bois.

Composants	Résultat (%)	Composants	Résultat (%)
CaO	32.01	SiO <sub>2</sub>	10.16
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.10	MgO	8.30
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.72	Na <sub>2</sub> O	0.66

Les analyses chimiques montrent que les composants chimiques principaux des cendres de bois sont : SiO<sub>2</sub>, CaO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO et Na<sub>2</sub>O qui sont les mêmes du ciment avec des pourcentages qui s'approchent.

### II.2.2.3. Granulats

#### a. Sable

On a utilisé un sable de carrière de classe (0/4), les résultats des essais de caractérisation sont présentés dans le tableau II-7.

**Tableau II-7:** Caractéristiques physiques du sable de carrière (classe 0/4).

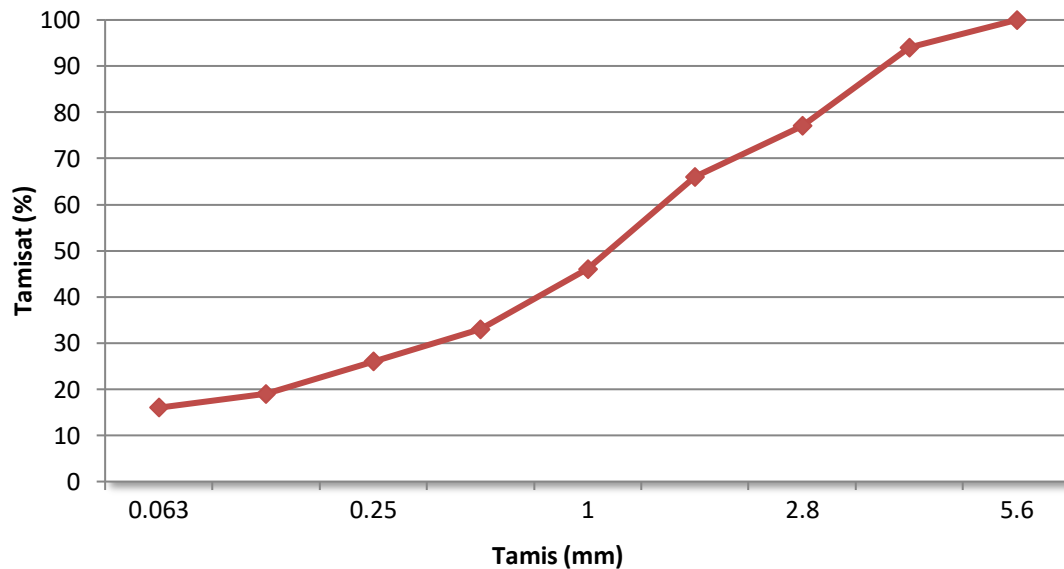
Caractéristiques	Résultat (%)
Masse volumique apparente ( $\text{g/cm}^3$ )	1,63
Masse volumique absolue ( $\text{g/cm}^3$ )	2.85
Equivalent de sable (propreté) (%)	72
Absorption d'eau (%)	1.81
Module de finesse Mf	2,94
Valeur au bleu de méthylène VB	0.8

Les caractéristiques physiques montrent que le sable est adéquat pour la confection d'un béton durable et de qualité.

La composition chimique du sable est donnée par le tableau II-8 et l'analyse granulométrique est présentée par la figure II-8.

**Tableau II-8:** Composition chimique de sable de carrière (classe 0/4) utilisé pour la phase béton.

Composant	Résultat (%)	Composant	Résultat (%)
CaCO <sub>3</sub>	82,80	SiO <sub>2</sub>	82,80
CaO	55,45	MgO	7,32
Cl	0,000	Na <sub>2</sub> O	0,000
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,18	K <sub>2</sub> O	0,18
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,08	--	--



**Figure II-8:** Courbe d'analyse granulométrique du sable de carrière (classe 0/4).

Le résultat d'analyse granulaire (figure II-8) est courant, la granulométrie de ce sable est continue.

### b. Gravier

Pour la confection de notre béton on a utilisé trois classes de gravier provenant de la carrière El-ghedir-Skikda (Algérie), ces classes sont : 4/8, 8/16 et 16/22,4, leurs propriétés physico-chimiques sont données par le tableau II-9.

**Tableau II-9:** Propriétés physico-chimiques des différentes classes de graviers utilisées.

Propriétés	Classe 4/8	Classe 8/16	Classe 16/22,4
Masse volumique apparente (g/cm <sup>3</sup> )	1.74	1.79	1.82
Masse volumique absolue (g/cm <sup>3</sup> )	2.75	2.77	2.79
Dureté (Los Angeles) (%)	/	20	/
Résistance à l'usure (Micro-Deval) (%)	/	14,2	/
Coefficient d'aplatissement (%)	8.74 %	6.81 %	6.19 %

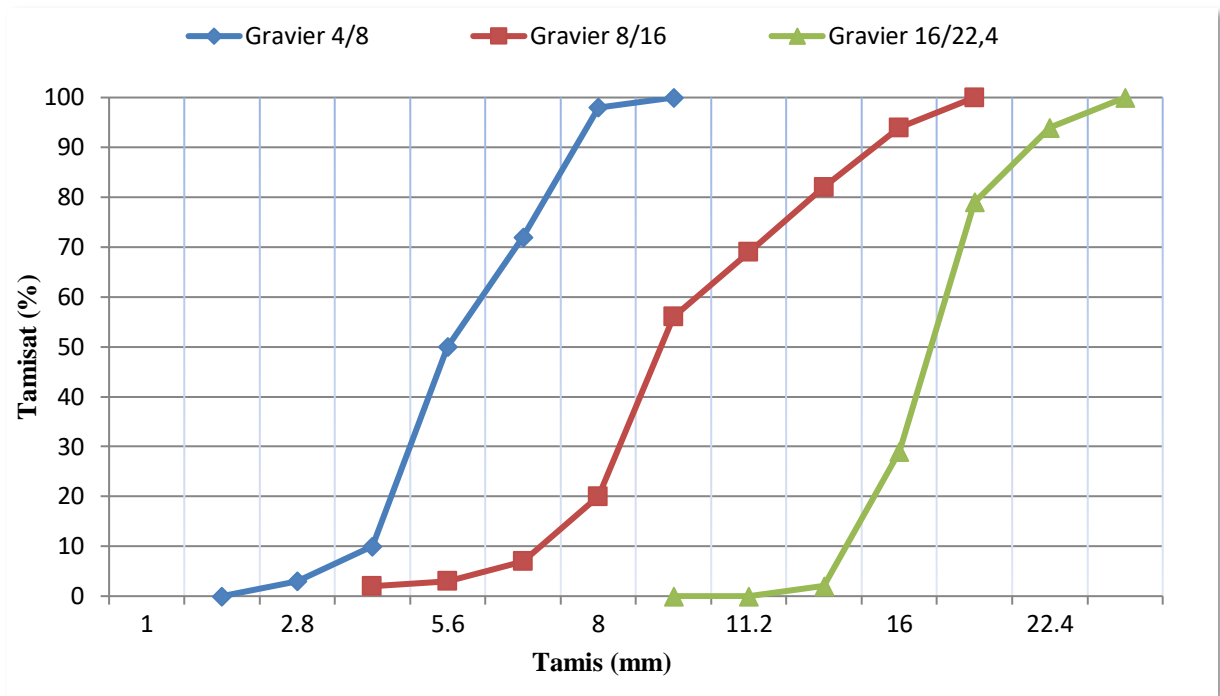
Les granulats présentent des caractéristiques convenables pour la confection d'un béton durable ayant de bonnes performances mécaniques.

La composition chimique des graviers est donnée par le tableau II-10; leur répartition granulométrique est présentée par la figure II-9.

**Tableau II-10:** Analyse chimique des graviers provenant de la carrière El-ghedir.

Désignation	Classe granulaire (mm)	Sulfate de magnésium (%)	Chlorures (%)	Sulfates solubles (%)	Soufre totale (%)	Matière organique (%)
Carrière El-ghedir	4/8		0.017	0.003	0.012	<0.1
	8/16	6	0.024	0.003	0.020	
	16/22,4		0.024	0.006	0.020	

Les analyses chimiques montrent que les différentes classes de gravier ne contiennent pas des pourcentages excessifs de matières nuisibles pour le béton.



**Figure II-9:** Courbe d'analyse granulométrique des différentes classes de gravier utilisé.

Les courbes granulométriques sont continués et présentent une moyenne régularité de la granularité.

#### II.2.2.4. Adjuvant

Le super plastifiant qu'on a utilisés dans notre étude est un Poly flow SR 5400 (haut réducteur d'eau conforme a la norme **NFEN-2**), c'est un adjuvant non chloré à base de polycarboxylates modifiés, il se présente sous la forme d'un liquide de couleur marron.

Le Poly flow SR 5400 confère au béton une haute réduction d'eau, un maintien prolongé de la rhéologie et peut même favoriser le développement des résistances initiales. Ses caractéristiques sont présentées dans le tableau II.11.

**Tableau II.11:** Caractéristiques du super plastifiant Poly flow SR 5400.

propriétés	Couleur	Densité	PH	Teneur en ions CL	Teneur Na <sub>2</sub> O	Extrait Sec
Valeur	Marron	1,07 ± 0,02	5	≤0,1%	≤2,5%	30 ± 1 %

#### II.2.2.5. L'eau de gâchage

On a utilités pour la confection du béton de l'eau avec les mêmes propriétés vues précédemment dans la phase mortier suivant la norme **NF P18-404**.

### II.3. Conclusion

Dans ce chapitre on a traité séparément les caractéristiques des matériaux de bases afin de les utiliser plus tard dans la partie expérimentale pour la confection des mélanges de mortier et de béton hydraulique.

D'après les résultats obtenus, nous avons tiré les observations suivantes :

- Les analyses chimiques montrent que les composants chimiques principaux des cendres de bois sont :  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$  et  $\text{Na}_2\text{O}$  qui sont les mêmes du ciment avec des pourcentages qui s'approchent donc la substitution sera possible.
- La densité des cendres de bois est inférieure à celle du ciment.
- La surface spécifique de Blaine des cendres de bois utilisées pour la confection du béton est supérieure à celle du ciment, cette finesse sera favorable lors de la substitution car la surface mise en contact avec l'eau sera importante ce qui implique une réactivité plus grande.
- Les granulats utilisés pour la confection du béton ont montré des caractéristiques physico-chimiques adéquates pour la confection d'un béton de qualité.

L'analyse des résultats de caractérisation des différents matériaux étudiés dans ce chapitre, montre que les matériaux identifiés sont appropriés pour la confection des mélanges de mortier et du béton, objet de notre programme expérimental traité dans les chapitres suivants.

# **CHAPITRE III : PROGRAMME EXPERIMENTAL ET METHODOLOGIE D'ESSAIS**

## III. Programme expérimental et méthodologie d'essais

### III.1. Introduction

Dans ce chapitre on va voir une description détaillée des différents essais expérimentaux ainsi que la formulation et la préparation des mélanges de mortier et de béton avec les variations des pourcentages. Ceci a pour but mettre en évidence l'influence de l'incorporation des cendres de biomasse sur les propriétés du béton et du mortier à l'état frais ainsi qu'à l'état durci.

### III.2. Programme expérimental

#### III.2.1. Programme expérimental réalisé sur le mortier

L'objectif de cette partie de recherche est de présenter le processus expérimental de la confection des différents mélanges de mortiers avec une substitution partielle de ciment par l'addition de cendre de bois, quatre taux de substitution ont été retenus (0%, 5%, 10%, 15%).

Nous présenterons aussi les détails des essais entretenus pour caractériser les mortiers et d'évaluer leurs performances. Notre programme expérimental est divisé comme suit :

**Tableau III-1:** Paramètres et essais effectués pour la partie mortier.

Notation	Type de mortier
M (0%)	Mortier à base de ciment CEM I
M (5%)	Mortier à base de 95% de ciment CEM I et 5% de cendre
M (10%)	Mortier à base de 90% de ciment CEM I et 10% de cendre
M (15%)	Mortier à base de 85% de ciment CEM I et 15% de cendre
Paramètres constants	E/L=0,58 - Sable
Paramètres variables	Taux de substitution, L= ciment + cendres
Nombre de mélange	04

#### III.2.1.1. Formulation des mélanges

La formulation du mortier témoin M 0% est basé sur la formule classique d'un mortier 1/3 (1 volume de ciment et 3 volumes de sable) avec les paramètres fixes sont le rapport E/L (L représente le ciment avec les cendres), la quantité d'eau a été fixée par des essais préliminaires de consistance.

Les compositions des mélanges (M5%, M10% et M15%) ont été obtenues en substituant une partie du ciment par 5, 10 et 15% des taux de cendre de bois (tableau 2).

**Tableau III-2:** Composition des mélanges de mortier.

Notation	Ciment (g)	Fillers de cendres (g)	Sable (g)	Eau (ml)
<b>M (0%)</b>	450	0	1350	261
<b>M (5%)</b>	427,5	22,5	1350	261
<b>M (10%)</b>	405	45	1350	261
<b>M (15%)</b>	382,5	67,5	1350	261

Les essais réalisés sur les mélanges à l'état frais et durci sont :

- Mesure de la densité selon la norme **NF EN 1015-6**.
- Mesure de la consistance selon la norme **NF EN 1015-3**.
- Mesure de l'air occlus selon la norme **NF EN 1015-7**.
- Résistance à la compression et à la traction par flexion à l'âge de 2, 7, 28 et 90 jours sur éprouvettes 4x4x16 cm<sup>3</sup> selon la norme **NF EN 1015-11**.
- Essai d'absorption par immersion sur éprouvettes 5x5x5cm<sup>3</sup> selon la norme **NBN EN 1015-18**.
- Essai d'absorption par capillarité sur éprouvettes 4x4x16 cm<sup>3</sup> selon la norme **NF EN 1015-18**.
- Essai pénétration des chlorures à l'âge de 28 jours sur éprouvettes 4x4x16cm<sup>3</sup> selon la norme **UNI 7928** et **JIS A 1171**.
- Essai de résistance aux attaques chimiques par l'acide chlorhydrique (5% HCL) et l'acide sulfurique (5% H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) sur éprouvettes 5x5x5cm<sup>3</sup> selon la norme **ASTM C-267-97**.
- Essai de diffractométrie de rayons X selon la norme **NF EN 15305** sur les résidus des éprouvettes immergées dans les acides 5% HCL et 5% H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.
- Essai de variation dimensionnelle (retrait et gonflement), sur éprouvettes 4x4x16cm<sup>3</sup> équipé de plot selon la norme **NF P15-433**.

### III.2.1.2. Fabrication des mélanges de mortier

#### ➤ Malaxage du mortier

Le mortier est réalisé conformément à la norme **EN196-1**. Le malaxage se fait dans un malaxeur à mortier (figure III-1), les divers constituants du mortier sont malaxés de façon à avoir un matériau de composition homogène. Les opérations de malaxage sont récapitulées dans le tableau III-3.



**Figure III-1:** Malaxeur à mortier.

**Tableaux III-3:** Opérations de malaxage du mortier.

Operations	Introduction de l'eau	Introduction du ciment		Introduction du sable		Raclage de la cuve		
Durée des opérations			30s	30s	30s	15s	1 min 15s	60s
Etat du malaxeur	Arrêt		Vitesse lente		Vitesse rapide	Arrêt		Vitesse rapide

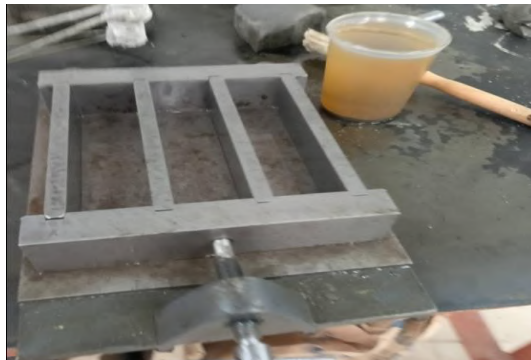
➤ **Moules**

Après le malaxage, le mélange est introduit dans des moules normalisés en acier permettant de réaliser les éprouvettes des essais programmés :

-Moule prismatique : moule triple pour prismes de mortier (4x4x16) cm<sup>3</sup>, pour l'essai de compression et traction par flexion, l'essai d'absorption capillaire ainsi que pour l'essai de pénétration des chlorures (figure III-2).

-Moule prismatique à plots : moule triple pour prisme de mortier (4x4x16) cm<sup>3</sup>, équipé de plots pour l'essai de retrait et de gonflement (figure III-3).

-Moule cubique (5x5x5) cm<sup>3</sup> pour l'essai d'absorption par immersion et l'attaque chimique par les acides et les bases (figure III-4).



**Figure III-2:** Moule triple pour prisme (4x4x16) cm<sup>3</sup>.



**Figure III-3:** Moule triple équipé de plots.



**Figure III-4:** Moule cubique (5x5x5) cm<sup>3</sup>.

#### ➤ Remplissage et vibration

Avant le remplissage des moules, on applique un lubrifiant sur leurs parois pour éviter toute cohésion de la pâte et faciliter le décoffrage. Le remplissage des éprouvettes se fait en deux couches vibrées sur une table à chocs.

On fixe le moule sur la table à chocs (figure III-5) pour le tassement (2x60 coups) selon la norme AFNOR NF P15-412 et la norme EN 196-1. On arase puis on lisse la surface du moule en enlevant l'excédent de mortier.



**Figure III-5:** Table à chocs.

#### ➤ Conservation des éprouvettes

- On introduit les moules dans une chambre humide à  $20^{\circ} \pm 1^{\circ}\text{C}$  d'une enceinte climatique (figure III-6) pendant 24 heures.
- Après 24 heures on démoule et on introduit les éprouvettes dans un bain d'eau, ou dans l'enceinte climatique de plus de 90% d'humidité et de température de  $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ .
- Les éprouvettes sont conservées dans l'eau jusqu'à une durée correspondante à l'âge des éprouvettes à tester pour les essais de traction et de compression.
- Les éprouvettes destinées à l'essai de retrait sont conservées à l'air libre à une température de  $20^{\circ} \pm 1^{\circ}\text{C}$  pour la mesure du retrait total et la variation de masse (perte de masse).

- Les éprouvettes destinées à l'essai d'absorption par immersion et capillaire, sont conservées à l'air 28 jours avant essais ensuite dans l'étuve (figure III-7) pendant 48h pour l'immersion et 72h pour l'absorption capillaire.
- Après 28 jours d'immersion dans l'eau, les éprouvettes destinées à l'attaque chimique par les acides et les bases sont soumises à deux (02) modes de conservation dans les différentes solutions citées ci-dessous:
  - 5% d'acide chlorhydrique (HCL),
  - 5% d'acide sulfurique (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>)
- Après 28 jours de cure sous l'eau, les éprouvettes destinées à l'attaque par les chlorures, sont conservées dans une solution de NaCL concentrée à 5% durant 28 jours.



**Figure III-6:** Enceinte climatique.



**Figure III-7:** Etuve du laboratoire.

### III.2.1.3. Méthodes d'essais sur mortier

#### a. Consistance par étalement

C'est un essai essentiel qui permet de déterminer la maniabilité du mortier, cet essai est réalisé à l'aide d'un mini cône posé sur une table à secousses. On utilise cette dernière afin d'assurer un seul régime de vibration et éliminer les bulles d'air dans le but d'obtenir une bonne compacité des constituants de mortiers suivant la norme **NF EN 1015-3**. L'étape suivante consiste à placer le mini cône au milieu de la table à secousses et on le remplit en deux couches, on lève le mini cône et on applique 15 chocs par la table à secousses et on mesure l'étalement avec une règle (figure III-8). L'étalement est égal à la moyenne des deux diamètres de la galette climatique.



**Figure III-8:** Essai de consistance du mortier par étalement.

#### b. Densité

La densité du mortier frais est mesurée en pesant un moule vide d'un volume connu et puis le même rempli de mélange de mortier de la manière conventionnelle (figure III.9) la densité est déduit selon la norme **NF EN 1015-6** par l'application de la formule suivante :

$$M_{VR} = (m - m_0) / v \text{ [kg/cm}^3\text{]}$$

Avec:

**m:** Masse du récipient après le remplissage

**m<sub>0</sub>:** Masse du récipient vide



**Figure III-9:** Mesure de la densité.

### c. Teneur en air occlus

La teneur en air occlus est mesurée à l'aide d'un aéromètre à mortier (figure III-10), de 1 litre. Après le malaxage des constituants de mortier, et suivant la norme **NF EN 1015-7**, on remplit le cuve d'aéromètre avec le mortier frais. La partie supérieure reste fixée, on applique une pression à l'aide de la pompe manuelle jusqu'à ce que l'aiguille de l'appareil indique 0%. A ce moment, on ouvre la valve qui sépare les volumes des deux chambres, le mortier se comprime et le manomètre intégré dans l'aéromètre indique directement le pourcentage de l'air occlus.



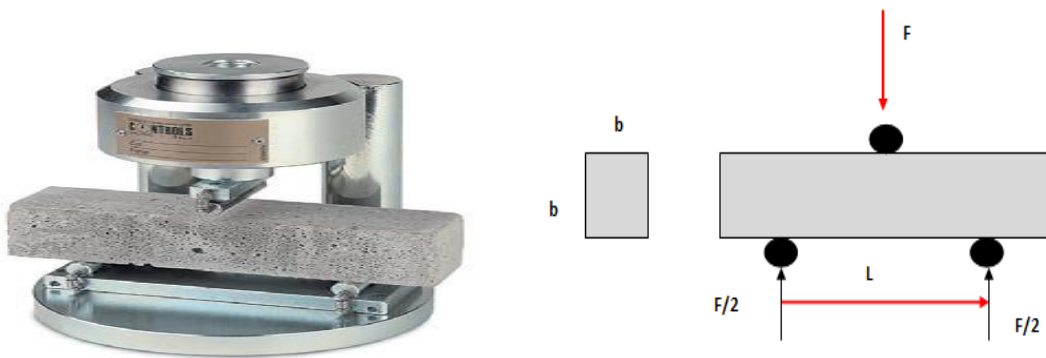
**Figure III-10 :** Aéromètre à mortier.

### d. Rupture par flexion

Ce test a été réalisé sur des éprouvettes de mortier de dimensions  $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ , le dispositif utilisé est un dispositif de flexion 3 points (figure III-11), comportant deux appuis à section semi-cylindrique de 10mm de diamètre, distant de 100 ou 106.7 mm (figure III-12), sur lesquels pose l'éprouvette prismatique suivant une force latérale de moulage, et un troisième appui de même diamètre, équidistant de deux premiers et transmettant de la charge  $F$  (figure III-12). Pour faire une répartition uniforme des efforts sur l'éprouvette, deux des appuis doivent pouvoir légèrement tournés autour de leurs centres, dans le plus vertical perpendiculaire aux axes des éprouvettes. L'augmentation de la charge se fait automatiquement et la force de rupture est indiquée en KN par une aiguille supplémentaire qui doit indiquer zéro après chaque essai.



**Figure III-11:** Presse hydraulique de flexion.



**Figure III-12:** Dispositif et schéma mécanique de l'essai de traction par flexion trois points.

La résistance à la traction par flexion est calculée conformément aux prescriptions de la norme **NF EN 1015-11** comme suit:

$$R_t = 1,5Fl/b^3 \text{ [Kg/cm}^2\text{]}$$

Avec :

- F : Charge appliquée en Kg
- l : Distance entre les appuis (cm)
- b : Coté de l'éprouvette en cm

Les éprouvettes sont testées à : 2j, 7j, 28j et 90j, après une cure dans l'eau correspondante à l'âge des éprouvettes à tester.

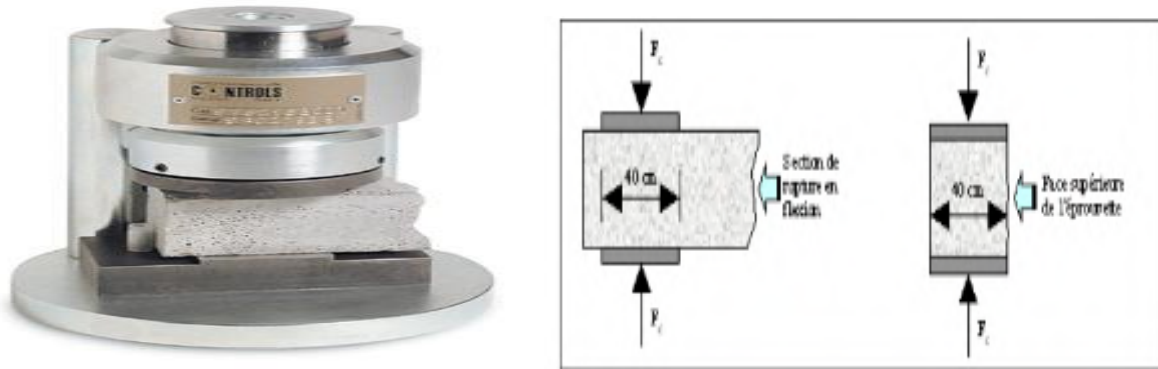
#### e. Rupture par compression

Les deux parties de l'éprouvette écrasée par l'essai de traction, sont testées en compression. Chaque demi-éprouvette est soumise à un test de compression sur ces facettes latérales de moulage, sous une section de 4x4cm, entre deux plaquettes métalliques dur d'au moins de 10mm d'épaisseur, de 40mm ± 0.1mm de largeur, ces plaquettes sont en carbure de tungstène, la demi-éprouvette est placée entre elles de manière que son extrémité intacte

dépasse d'au moins 1cm et que les arrêtes longitudinaux d'éprouvettes soient perpendiculaires à celle des plaques (figure III-13).

Les plaquettes sont guidées sans frottement au cours de l'essai, de manière à avoir la même projection horizontale, l'une d'elles peut s'incliner légèrement pour permettre le contact parfait, plaquette-faces d'éprouvettes (figure III-13).

L'augmentation de la charge se fait automatiquement et la force de rupture est indiquée selon la norme **NF EN 1015-11** en KN par une aiguille supplémentaire qu'on doit remettre à zéro après chaque essai.



**Figure III.13:** Dispositif et schéma de l'essai de compression sur éprouvette 4x4x16cm<sup>3</sup>.

La résistance à la compression est la moyenne arithmétique des valeurs déterminées par six essais. Cette résistance est calculée suivant la formule :

$$R_c = F/S \text{ [Kg/cm}^2\text{]}$$

F : Charge appliquée en Kg

S : Section latérale de l'éprouvette égale à 16 cm<sup>2</sup>

Pareil à l'essai de traction par flexion, les éprouvettes sont testées à : 2, 7, 28 et 90 jours, après une cure dans l'eau correspondante à l'âge des éprouvettes testées.

#### f. Essai d'absorption par immersion

L'absorption par immersion selon la norme **NBN EN 1015-18** consiste à mettre les éprouvettes cubiques (5x5x5) cm<sup>3</sup> du mortier immergées totalement dans l'eau à 20°C pendant une durée de 48 heures c'est-à-dire jusqu'à la saturation complète du matériau, ensuite dans l'étuve à une température de 105 °C jusqu'à une masse constante, puis les retirer et les peser (figure III-14).

Le coefficient d'absorption par immersion (Ab) est le résultat de la moyenne des valeurs d'essai réalisé sur plusieurs éprouvettes d'un même échantillon, donné par la formule suivante :

$$Ab = \frac{(Mh - Ms)}{Ms} 100 \%$$

Avec :

Mh : Masse de l'éprouvette humide

Ms : Masse de l'éprouvette sèche  
 Ab : coefficient d'absorption d'eau par immersion



Figure III.14: Eprouvettes cubiques pour l'essai d'absorption par immersion.

**g. Essai d'absorption capillaire**

Cette caractéristique reflète la quantité d'eau pouvant être absorbée par l'éprouvette lorsqu'une seule face de l'élément est en contact avec de l'eau. Elle s'exprime par le coefficient de capillarité C g/(m<sup>2</sup>.s<sup>1/2</sup>).

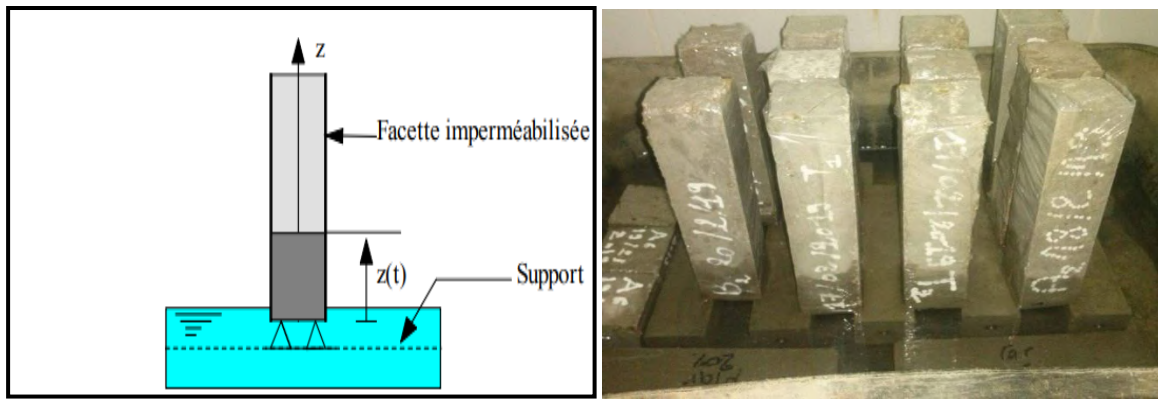
Les éprouvettes sont séchées à 70 °C pour déterminer la masse sèche. Elles sont ensuite mises en contact avec 3 mm d'eau par l'une de leurs faces (figure III-15). Les faces latérales sont imperméabilisées à l'aide d'un film plastique (un ruban plastique adhésive) qui force l'eau à adopter un cheminement uni-axial et éviter l'évaporation par ces mêmes faces. La masse d'eau absorbée est déterminée par des pesées successives des échantillons. L'évolution de la masse suit un intervalle régulier qui est porté sur un graphique en fonction de √t.

Généralement, cette évolution est linéaire par rapport à √t. Le coefficient de capillarité (C) est alors calculé comme indique la formule suivante :

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

Avec :

- mi : la masse au temps i
- md : la masse sèche
- A : la surface en contact avec l'eau



**Figure III-15:** Dispositif expérimental Essai absorption capillaire.

#### h. Essai d'attaque chimique par les acides

En vue d'améliorer la durabilité des mortiers, on a évalué l'influence de l'ajout cendre sur ses caractéristiques vis-à-vis des milieux agressifs tels que les acides.

Les mortiers ont été coulés dans des moules cubiques 5x5x5cm. Après 24 heures, les éprouvettes ont été démoulées et conservées dans l'eau à une température constante de 20°C et une humidité relative de 95 % pendant 28 jours.

Après 28 jours de cure dans l'eau, les éprouvettes sont pesées pour déterminer  $M_1$ , puis elles sont immergées dans les différentes solutions (figure III-16) citées ci-dessous et renouvelées chaque 28 jours (selon la valeur du PH) :

- 5% d'acide chlorhydrique (HCL) acide fort,
- 5% d'acide sulfurique ( $H_2SO_4$ ) acide fort,

La résistance due aux agressions chimiques des échantillons immergés dans ces solutions, est évaluée par leur perte de masse selon la norme **ASTM C-267-97**, les éprouvettes sont purifiées 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 effectuées après 1, 7, 14, 21, 28, 56 et 90 jours après l'immersion.

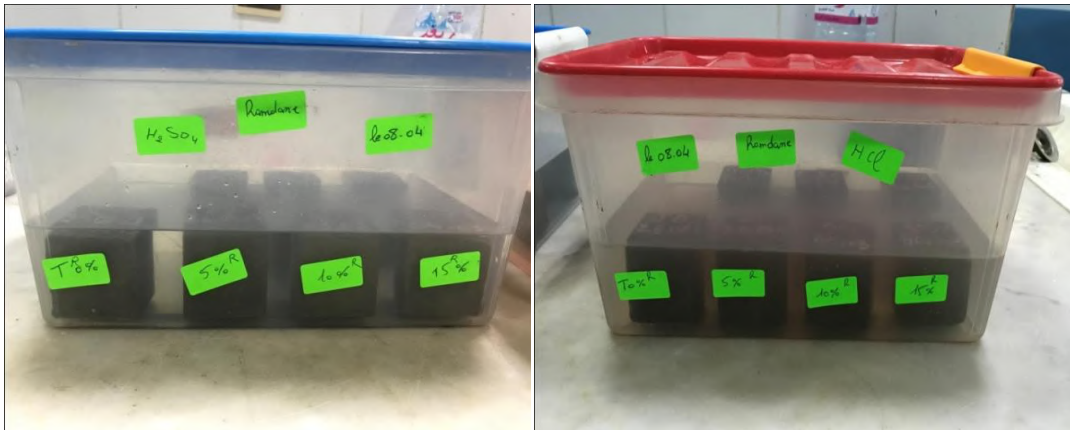
La résistance chimique est évaluée par la mesure perte de masse de l'éprouvette :

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

Avec :

$M_1$  : masse de l'éprouvette avant l'immersion

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



**Figure III-16:** Eprouvettes cubiques 5x5x5 cm immergées dans les acides dosés à 5% d'HCL et 5% de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.

#### i. Diffractométrie de rayons X (DRX)

L'essai diffractométrie de rayons X (DRX) sur poudre est une méthode d'analyse physico-chimique réalisée suivant les règles de la norme **NF EN 15305**, l'essai consiste à étudier les différentes phases de matières et matériaux cristallins. L'essai DRX (figure III-17) permet aussi d'identifier et de quantifier les éléments chimiques constituant le matériau.

La diffraction a été réalisée sur les résidus des éprouvettes immergées dans les solutions 5% HCL et 5% H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> après un broyage très fin.

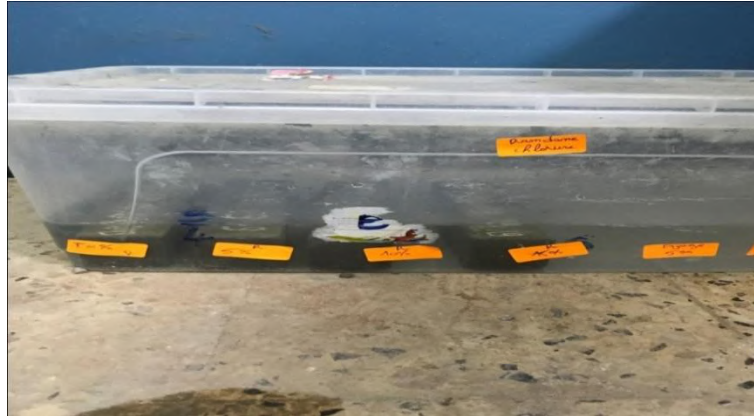


**Figure III-17:** Essai diffractométrie de rayons X.

### j. Essai d'attaque des mortiers par les chlorures

Pour les échantillons d'essais, on a utilisé des éprouvettes prismatiques 4x4x16 cm. Après 24 heures, les échantillons sont démoulés et conservés dans l'eau à 20°C pendant 28 jours, dans lesquelles elles sont immergées dans une solution de NaCl concentrée à 5% (figure III-18).

Après 28 jours d'immersion dans la solution NaCl, la résistance à la pénétration des chlorures est déterminée selon les normes **UNI 7928** et **JIS A 1171**. La solution d'essai NaCl doit être changée tous les 28 jours durant toute la période d'immersion de 90 jours.



**Figure III-18:** Eprouvettes prismatiques immergées dans la solution NaCl concentrée à 5%.

A chaque essai (28 jours), l'éprouvette sera coupée en deux afin d'obtenir des mini-prismes 4x4x 8cm (figure III-19). Puis on verse sur chaque section coupée une solution de nitrate d'argent  $\text{AgNO}_3$  puis on attend que les surfaces l'absorbent. 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 cette partie colorée à l'aide d'un pied à coulisse sur plusieurs positions (figure III-20). La profondeur de pénétration (X) est la moyenne de toutes les lectures.



**Figure III-19:** Sciage des éprouvettes 4 x 4 x 16 cm de mortier.



**Figure III-20** : Versement des nitrates d'argent  $\text{AgNO}_3$  et mesure de la profondeur de pénétration des chlorures.

### k. Variation dimensionnelle (retrait et gonflement)

#### - **Retrait**

L'objectif de cet essai est de mesurer en fonction du temps, la variation de longueur due aux effets d'hydratation et de dessiccation des matériaux cimentaires, les principaux paramètres agissant sur le retrait sont :

- La nature du ciment.
- La finesse de mouture.
- Le dosage en ciment, dans le béton.
- Le dosage en eau.
- La propreté et nature des granulats

Cet essai est réalisé sur des éprouvettes prismatiques équipées de plots de dimensions (4×4×16 cm) (figure III-21), grâce à un deformometre (figure III-22), permettant de mesurer les variations de longueur des échantillons, conservés à une température de  $20 \pm 1 \text{ C}^\circ$  et à  $70 \pm 5\%$  d'humidité relative.

L'expression du retrait se traduit par le rapport de variation de longueur de l'éprouvette ( $\Delta l$ ) en fonction du temps et la longueur initiale de l'éprouvette ( $l$ ) pour différentes échéances de temps : 2,7 et 28 jours. Le retrait est calculé selon la norme **NF P15-433** suivant la formule :

$$\text{Retrait} = \frac{\Delta l}{l} \times 1000$$

Avec :

$l$  : longueur initiale

$\Delta l$  : variation de longueur



**Figure III-21:** Epreuves prismatiques équipées de plots.



**Figure III-22:** Deformomètre.

### I. Gonflement

Cet essai a le même principe que l'essai précédent, effectué sur des éprouvettes prismatiques équipées de plots de dimensions (4×4×16 cm), grâce à un deformometre (figure III-23), permettant de mesurer les variations de longueur, sauf que les éprouvettes sont conservées dans l'eau à une température de  $20 \pm 1 \text{ C}^\circ$ .

Après gâchage, les mortiers gonflent en présence d'eau. Certains gonflements entraînent des désordres dans les ouvrages (baisse de résistance mécanique, fissures, défauts d'étanchéité, etc). Le phénomène du gonflement est observé même en présence d'un ciment parfaitement stable et sans ajouter aucun élément expansif.

Cette variation de volume (gonflement), est dû à la consommation de la portlandite  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  et à la combinaison de l'oxyde de magnésium et à l'épuisement de la chaux libre pendant les réactions d'hydratation avec l'ajout incorporé dans le ciment.

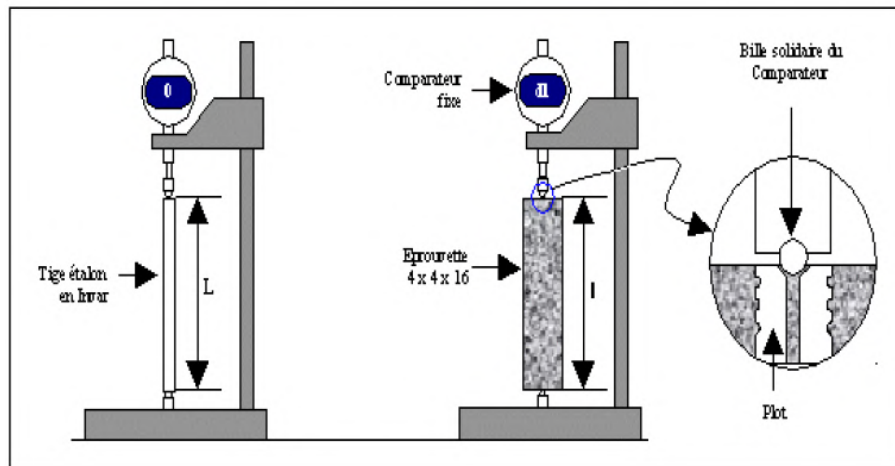
L'expression du gonflement suivant la norme **NF P15-433** se traduit par le rapport de variation de longueur de l'éprouvette ( $\Delta l$ ) en fonction du temps et la longueur initiale de l'éprouvette ( $l$ ) pour différentes échéances de temps : 2,7 et 28 jours. Le gonflement est calculé suivant la formule :

$$\text{Gonflement} = \frac{\Delta l}{l} \times 1000$$

Avec :

$l$  : longueur initiale

$\Delta l$  : variation de longueur.



**Figure III-23:** schéma de dispositif utilisé pour mesurer le retrait et le gonflement.

### III.2.2. Programme expérimental réalisé sur le béton

L'objectif de cette partie de recherche est de présenter le processus expérimental de la confection des différents mélanges de béton avec une substitution partiel de ciment par l'addition de cendre de bois, voici les pourcentages de substitution retenus (2%, 4%, 6%, 8%, 10%, 12%, 14%, 16%, 18%).

Nous présenterons aussi les détails des essais entretenus pour caractériser les mélanges de béton et d'évaluer leurs performances à l'état frais (densité, consistance) ainsi qu'à l'état durci (résistance à la compression, résistance à la traction par flexion, essai au scléromètre, ultrason, absorption d'eau par immersion, absorption d'eau par capillarité, pénétration des chlorures et la résistance face aux acides).

#### III.2.2.1. Approche théorique de la formulation du béton hydraulique

L'étude de la composition d'un béton consiste à définir un mélange optimal de ses différents composants à fin d'obtenir les caractéristiques voulus selon la nature de l'ouvrage souhaité.

Plusieurs méthodes de formulations ont été élaborées : Caquot, Faury, Dreux-Gorisse, Baron-Lesage, etc. Chacune de ces méthodes reposent sur des propres hypothèses.

Dans la littérature on trouve plusieurs méthodes de composition de béton qui ont été élaborées. On peut citer par exemple : méthode de Dreux-Gorisse, méthode de Bolomey, méthode de Faury...etc.

Dans notre étude, nous avons opté pour la méthode Dreux-Gorisse car c'est une méthode dont l'utilisation est relativement simple et ses résultats sont satisfaisants.

### III.2.2.2. Formulation des mélanges

La formulation du mélange témoin du béton a été obtenue par la méthode Dreux-Gorisse, cette méthode a pour but déterminer d'une façon simple et rapide une formule de composition du béton selon des besoins prédéfinis.

Notre approche de formulation repose sur les considérations suivantes : des paramètres fixes (le rapport E/C, dosage en ciment, squelette granulaire continue et le dosage en adjuvant) ; un paramètre variable (le taux de substitution du ciment par les cendres de bois).

La formulation adoptée a été fournie par le laboratoire national de construction et de l'habitat (LNHC) où elle a été testée et approuvée.

### III.2.2.3. Etude de la composition des mélanges de béton

Dans le tableau III-4 on présente les différentes compositions des mélanges du béton hydraulique élaborés ainsi que les paramètres fixes et variables.

**Tableau III.4:** Différentes compositions utilisées dans l'étude du béton hydraulique contenant les cendres de biomasse.

Notation	Type de béton
<b>B (0%)</b>	Béton témoin à base de CEM II et des graviers concassés et sable concassé.
<b>B (6%)</b>	Béton témoin à base de 94% de CEM II et 6% de cendres et des graviers concassés et du sable concassé.
<b>B (12%)</b>	Béton témoin à base de 88% de CEM II et 12% de cendres et des graviers concassés et du sable concassé.
<b>B (18%)</b>	Béton témoin à base de 82% de CEM II et 18% de cendres et des graviers concassés et du sable concassé.
<b>Paramètres constants</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rapport E/L égale à 0,55 (L= ciment + cendres)</li> <li>• Dosage en ciment égale à 350 kg/m<sup>3</sup>,</li> <li>• Squelette granulaire continue.</li> <li>• Dosage en adjuvant 1.3%</li> </ul>
<b>Paramètres variables</b>	Taux de substitution du ciment par les cendres de bois

### III.2.2.4. Formulation des mélanges de béton contenant des cendres de biomasse

Dans le tableau III.5 on présente la formulation du béton hydrauliques adoptées pour réaliser nos essais tandis que le tableau III.6 expose d'une manière détaillée la composition des différents mélanges réalisés.

**Tableau III.5:** Formulation des mélanges de béton contenant des cendres de biomasse.

Béton	Ciment Kg	Cendres Kg	Eau L	Adjuvant L	Sable concassé 0/4 Kg	Gravier 4/8 Kg	Gravier 8/16 Kg	Gravier 16/22,4 Kg
<b>BT</b>	350	----	160	3.36	842	128.7	577	280
<b>B (6%)</b>	329.02	20.98	160	3.36	842	128.7	577	280
<b>B (12%)</b>	307.99	42.01	160	3.36	842	128.7	577	280
<b>B (18%)</b>	287	63	160	3.36	842	128.7	577	280

**Tableau III.6:** Composition des mélanges de béton contenant des cendres de biomasse.

Béton	Ciment Kg	Cendres Kg	Eau L	Adjuvant L	Sable concassé 0/4 Kg	Gravier 4/8 Kg	Gravier 8/16 Kg	Gravier 16/22,4 Kg
<b>BT</b>	16.65	----	7.57	0.16	40.05	6.12	27.45	13.32
<b>B (6%)</b>	15.652	0.999	7.57	0.16	40.05	6.12	27.45	13.32
<b>B (12%)</b>	14.652	1.998	7.57	0.16	40.05	6.12	27.45	13.32
<b>B (18%)</b>	13.653	2.997	7.57	0.16	40.05	6.12	27.45	13.32

- **Les essais réalisés sur les mélanges à l'état frais et à l'état durci sont :**

- Mesure de la densité selon la norme **NF EN 12350-6**.
- Mesure de l'ouvrabilité par affaissement au cône d'Abrams selon la norme **NF P18-451**.
- Résistance à la compression à l'âge de 7, 28 et 90 jours sur éprouvettes cubiques 15x15x15cm<sup>3</sup> selon la norme **NF P18-406** (2 éprouvettes par essai).
- Résistance à la traction par flexion à l'âge de 7, 28 et 90 jours sur éprouvettes 7x7x28 cm<sup>3</sup> selon la norme **NF P18-407** (2 éprouvettes par essai).
- Essai au scléromètre à l'âge de 28 jours sur éprouvettes cubiques de 20x20x20 cm<sup>3</sup> selon la norme **EN12-504-2**.
- Essai ultrason à l'âge de 28 jours sur éprouvettes cubiques de 20x20x20 cm<sup>3</sup> selon la norme **EN12-504-4**.
- Essai d'absorption par immersion sur éprouvettes cubiques de 10x10x10 cm<sup>3</sup> selon la norme **NF P 18-555**.
- Essai d'absorption capillaire sur éprouvettes 7x7x28 cm<sup>3</sup> selon la norme **NBN EN 1925**.
- Essai pénétration des chlorures à l'âge 28 jours sur éprouvettes cubiques 10x10x10cm<sup>3</sup>. Les échantillons ont été coupés et traités par une solution de nitrate d'argent (AgNO<sub>3</sub>) sur la surface découpée du béton selon la norme **NF EN 12390-11**.

-Attaque chimique par des acides et des bases effectuée sur les parties issues des éprouvettes prismatiques  $7 \times 7 \times 28 \text{ cm}^3$  (après l'essai de résistance à la traction par flexion) ; les chutes sont coupées en cube et puis conservées pendant 28 jours dans l'eau ensuite dans la solution chimique. La perte en poids en fonction de l'âge est mesurée conformément à la norme ASTM C- 267-96.

### III.2.2.5. Fabrication des mélanges de béton

#### -Malaxage

Afin d'obtenir un béton de bonne qualité il faut d'abord assurer un bon malaxage de ses différents constituants. Le malaxage du béton se fait dans un malaxeur à axe vertical (Figure III-24), muni d'une cuve de 132 L de volume avec une vitesse de rotation de 24 tours/minute.

Après le pré-mouillage du malaxeur pour limiter l'absorption supplémentaire de l'eau de gâchage par les parois, on procède aux différentes étapes de malaxage détaillées par le tableau ci-dessous.

**Tableau III.7:** Méthode de malaxage des mélanges béton

Temps	De 0 à 1 min	De 1 à 1 min 30	De 1min30 à 3min 30	De 3min 30 à 3 min 45	De 3min 45 à 5 min	5 min
Etape	Malaxage à sec des constituants solides	Ajout de l'eau	Malaxage	Ajout de l'adjuvant	Malaxage	Vidange du malaxeur



**Figure III-24:** Malaxeur à axe vertical.

#### -Moules utilisés

Après le malaxage, le béton a été coulé dans des moules normalisés (figure III-25) pour confectionner les éprouvettes destinées aux essais voulus, on a :

- Moule cubique  $(20 \times 20 \times 20) \text{ cm}^3$  pour l'essai résistance à la surface (scléromètre) et l'essai ultrason.
- Moule cubique  $(15 \times 15 \times 15) \text{ cm}^3$  pour l'essai de résistance à la compression.

- Moule cubique (10 x 10 x 10) cm<sup>3</sup> pour l'essai absorption par immersion et pénétration des chlorures.
- Moule prismatique triple (7 x 7 x 28) cm<sup>3</sup> pour l'essai résistance à la traction par flexion et l'essai d'absorption capillaire.



**Figure III-25:** Les différents types des moules utilisés.

#### **-Remplissage et vibration**

Avant le remplissage, on doit d'abord appliquer une bonne couche de lubrifiant pour empêcher toute adhérence entre le mélange et les parois ainsi que pour faciliter le décoffrage et obtenir des éprouvettes intactes (figure III-26). La mise en œuvre du béton dans les moules aura lieu par le mode de vibration ou par piquage, en fonction de la maniabilité du béton.

Concernant notre cas on a opté pour une vibration manuelle, on a donc rempli les moules en béton frais en deux couches successives et nous avons appliqué 25 coups à l'aide d'une tige métallique sur chaque couche. On termine ce processus par l'arasement qui se fait par une règle en acier.



**Figure III-26:** Décoffrage des éprouvettes (15 x 15 x 15) cm<sup>3</sup>.

### -Conservation des éprouvettes

Après le démoulage, les éprouvettes sont conservées selon la nécessité de chaque essai

- Les éprouvettes sont conservées dans l'eau ( $20^{\circ}\text{C}\pm 1^{\circ}\text{C}$ ) jusqu'à une durée correspondante aux âges des essais (7, 28 et 90 jours) pour les essais de résistance à la compression et à la traction par flexion (figure III-27).



**Figure III-27:** Conservation des éprouvettes dans l'eau.

- Les éprouvettes destinées à l'essai d'absorption par immersion et par capillarité sont conservées pendant 28 jours à l'air libre à une température de  $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$  et une humidité relative de  $60\pm 2\%$  avant d'entamer la procédure de chaque essai.
- Les éprouvettes destinées à l'essai scléromètre et ultrasons sont conservées dans l'eau à une température de  $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ , jusqu'à 28 jours.
- Après 28 jours d'immersion dans l'eau à une température de  $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ , les éprouvettes destinées aux attaques chimiques par les acides et les bases sont conservées dans les solutions suivantes :
  - 3.5 % d'acide chlorhydrique (HCL)
  - 3.5% d'acide sulfurique ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ )
  - 3.5% d'acide acétique ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ )
  - 3.5% d'hydroxyde de potassium (KOH)
  - 3.5% de chlorure de sodium (NaCl)
- Après 28 jours de conservation dans l'eau à une température de  $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ , les éprouvettes programmées pour l'essai pénétration des chlorures, sont immergées dans une solution de NaCl concentrée à 5% jusqu'à l'arrivée du jour du teste.

#### III.2.2.6. Méthodes d'essais

##### a. Affaissement au cône d'Abrams

La consistance du béton hydraulique frais est mesurée généralement par l'affaissement au cône d'Abrams conformément à la norme **NF P 18-451** (figure III-28), cet essai consiste à remplir le moule conique normalisé fixé sur une plaque avec le mélange du béton. Le

remplissage se fait en 3 couches de préférence de la même hauteur et on y applique 25 coups de tige d'une manière répartie. Après le remplissage le cône doit être arasé à l'aide d'une règle ou en faisant rouler la tige de piquage. On termine le teste par le soulèvement du cône et la mesure de l'affaissement du béton donné par le cm.



Figure III-28 : Essai d'affaissement au cône d'Abrams.

### b. Densité

La densité apparente du béton frais ou la masse volumique est calculée en pesant un moule vide dont le volume est connu, après l'application de la couche de lubrifiant, et ensuite le même rempli de mélange de béton (figure III-29). La formule de calcul est donnée comme suit :

$$\rho = \frac{m - m_0}{V} \text{ [g/cm}^3\text{]}$$

$\rho$  : Masse volumique du béton (g/cm<sup>3</sup>)

$m$  : Masse du moule vide (g)

$m_0$  : Masse du moule rempli (g)

$V$  : Volume du moule (cm<sup>3</sup>)



Figure III-29: Essai de densité.

### c. Résistance à la compression

L'essai destructif de compression est exécuté selon la norme **NF P18-406** via une presse hydraulique de capacité de 3000 KN (figure III-30). L'éprouvette en béton est positionnée au milieu entre les deux plateaux de la machine, puis on applique une charge de compression lente et constante jusqu'à la rupture de l'éprouvette. La valeur obtenue représente la contrainte de rupture maximale et peut être représentée par l'équation qui suit :

$$\sigma_{rup} = F_{max}/S$$

Avec :

$\sigma_{rup}$  : Résistance à la compression (MPa)

$F_{max}$  : Charge de rupture (N)

$S$  : Surface d'éprouvette (mm<sup>2</sup>)

Après la fin du chargement, on observe une rupture selon des plans obliques avec la formation de deux pyramides tronquées et opposées (figure III-31). Ce mode de rupture reste lié aux forces de frottement entre les plaques (plateaux) de la presse et les facettes de l'éprouvette soumises aux forces de compression.

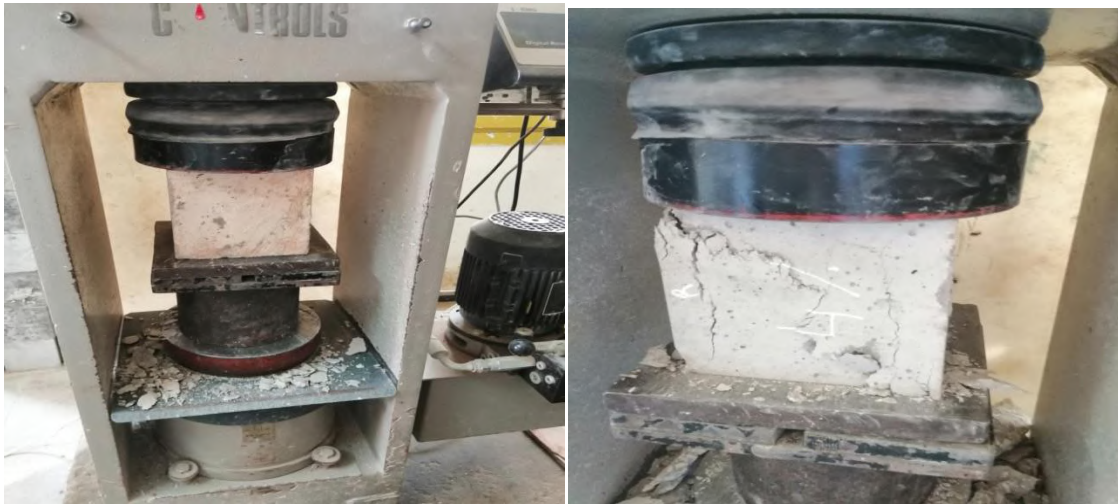


Figure III-30: Essai résistance à la compression.

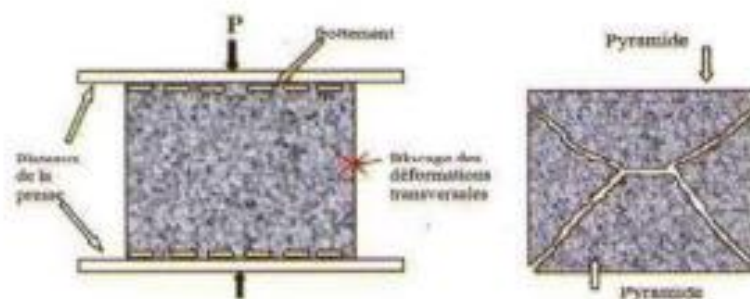


Figure III-31 : Mode de rupture pyramidal du cube.

#### d. Résistance à la traction par flexion

L'essai de résistance à la traction par flexion est réalisé sur des éprouvettes prismatiques de dimensions  $(7 \times 7 \times 28)$  cm<sup>3</sup>, à l'aide d'une machine à flexion (figure III-32) qui peut atteindre un chargement maximal de 100KN, celle-ci est muni d'un dispositif de 3 points. Le dispositif comportant deux appuis à sections cylindriques dans la partie inférieure la ou on pose l'éprouvette d'une manière soigneusement centrée. La partie supérieure représente la partie mobile avec laquelle la charge de flexion est appliquée. L'application de la charge est effectuée d'une manière continue et sans chocs jusqu'à rupture de l'éprouvette. Selon la norme **NF P18-407**, la formule permettant d'obtenir la contrainte de rupture en traction par flexion est la suivante :

$$R_t = 1,5F/l/b^3$$

Avec :

R<sub>t</sub>: Résistance en traction par flexion en MPa

F: Charge appliquée en N

l: Distance entre les appuis (mm)

b: Coté de l'éprouvette en mm



**Figure III-32:** Essai résistance à la traction par flexion.

#### e. Essai au scléromètre

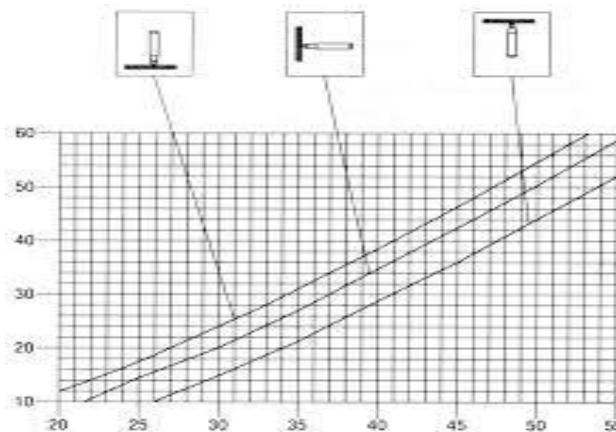
L'essai au scléromètre (figure III-33) est un essai non destructif qui permet d'estimer la résistance à la surface d'une éprouvette en béton. L'avantage des essais non destructifs c'est qu'ils nous permettent de réaliser des études sur la structure sans carottage comme dans le cas de réhabilitation et rénovation.

Ce test est exécuté suivant les principes de la norme **NF EN 12504-2**, l'appareil projette une bille sur la surface désirée ce qui relève la hauteur du rebond ensuite on fait la lecture sur la partie graduée du scléromètre (figure III-34), à partir de la valeur initiale trouvée.

La résistance obtenue à travers cet essai permet d'estimer la rigidité à la surface du béton étudié mais il reste nécessaire d'effectuer plusieurs mesures des différents côtés de l'éprouvette.



**Figure III-33:** Résistance à la surface au scléromètre.



**Figure III-34:** Partie graduée du scléromètre.

#### f. Essai aux ultrasons

La méthode ultrasonore est une méthode non destructive du béton qui utilise un mode de transmission en conformité avec la norme **NF EN 12504-4**. Les capteurs de l'ultrason (émetteur et récepteur) sont placés d'une manière opposée sur les facettes latérales de l'éprouvette (figure III-35). La vitesse de propagation du son est donnée par le rapport entre la longueur de l'éprouvette et le temps, cette relation est traduite par l'équation suivante :

$$V=L/T$$

Avec :

V: La vitesse de propagation du son en km/s

L: La longueur parcourue en mm

T: Le temps que met l'impulsion pour parcourir la longueur en seconde.



**Figure III-35:** Essai ultrason.

### g. La méthode combinée

Les résultats obtenus des essais précédents, résistance au scléromètre et résistance à l'ultrason sont combinés en utilisant la formule suivante :

$$R_{cc} = \frac{Is^2}{[(3,64 + 0,023Is) - (0,56xVp)]^2}$$

Avec :

R<sub>cc</sub>: La résistance à la compression combinée

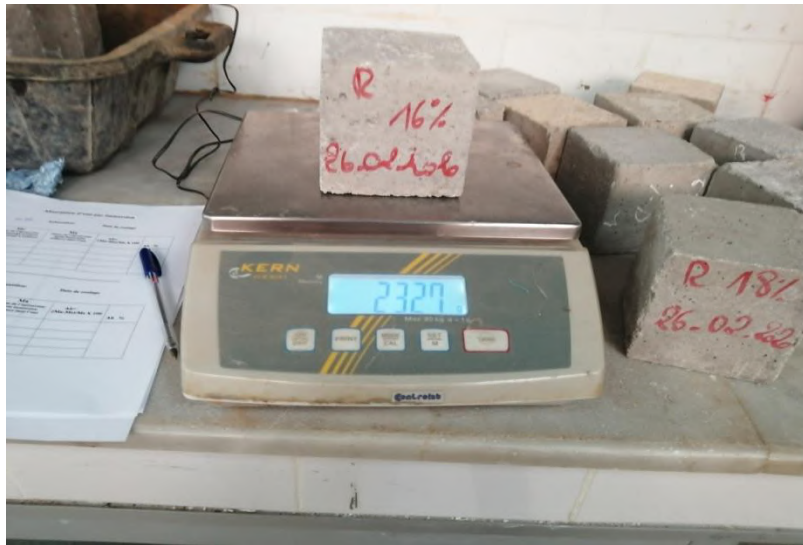
Is: Indice sclérométrique

V<sub>p</sub>: Vitesse de propagation du son.

La combinaison scléromètre/ultrasons améliore la précision de l'estimation de la résistance du béton, ceci rend les résultats plus fiables.

### h. Absorption d'eau par immersion

Comme vu précédemment dans la campagne mortier, l'absorption d'eau par immersion consiste à mettre les éprouvettes cubiques de béton dans l'eau à une température de 20°C ± 1°C pendant une durée de 48 heures c'est-à-dire jusqu'à la saturation du matériau, ensuite dans l'étuve à 105 °C jusqu'à une masse constante, puis les retirer et les peser (figure III-36).



**Figure III-36:** Détermination du poids des éprouvettes pour l'essai absorption par immersion.

Le coefficient d'absorption par immersion ( $A_b$ ) est donné en conformité avec la norme **NF P 18-555** par la formule :

$$A_b = \frac{(M_{\text{humide}} - M_{\text{sèche}})}{M_s} \times 100 \quad \%$$

Avec :

$A_b$  : Le coefficient d'absorption par immersion

$M_{\text{humide}}$  : La masse humide de l'éprouvette après l'immersion

$M_{\text{sèche}}$  : La masse sèche de l'éprouvette après l'immersion

#### i. Absorption d'eau par capillarité

L'absorption d'eau par capillarité du béton est effectuée sur des éprouvettes prismatiques ( $7 \times 7 \times 28$ )  $\text{cm}^3$  suivant la norme **NBN EN 1925**. Cette caractéristique reflète la quantité d'eau qui peut être absorbée par le matériau lorsqu'une seule facette de l'élément est en contact avec de l'eau. Elle s'exprime par le coefficient de capillarité  $C$   $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{1/2})$  comme le ca du mortier.

Les prismes sont séchés à une température de  $70 \text{ }^\circ\text{C} \pm 3^\circ\text{C}$  pour déterminer la masse sèche. Ils sont ensuite mis en contact avec 3 mm d'eau par l'une de leurs faces (figure III-37). Les faces latérales sont imperméabilisées à l'aide d'un film transparent en plastique adhésive qui force l'eau à suivre un cheminement uni-axial et éviter l'évaporation par ces mêmes faces. Le coefficient d'absorption est calculé par la relation suivante :

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

Avec :

$m_i$  : la masse au temps  $i$

$m_d$  : la masse sèche

$A$  : la surface en contact avec l'eau



**Figure III-37:** Essai absorption par capillarité du béton.

#### j. Résistance face aux attaques chimiques

Dû à la propagation du virus Covid19 et suite à la clôture des universités à cause des précautions sanitaires, les essais des attaques chimiques ont été réalisés à domicile en suivant le même processus habituel de la norme **ASTM C- 267-96** (figure III-38). Pour compléter l'étude de la substitution partielle du ciment par les cendres de bois dans le béton on doit passer par la durabilité.



**Figure III-38:** Essai résistance chimique.

La mesure de la résistance face aux attaques chimiques par les acides et les bases est effectuée sur les parties issues des éprouvettes prismatiques  $7 \times 7 \times 28 \text{ cm}^3$  après l'essai de résistance à la traction par flexion. Le reste des éprouvettes sont coupées en cube d'une manière approximative et puis conservées pendant 28 jours dans l'eau ensuite dans la solution chimique (figure III-39). Après des âges bien déterminés on mesure la différence de poids des éprouvettes qui ont été conservées dans les solutions suivantes :

- 3.5% d'acide chlorhydrique (HCl) acide fort
- 3.5% d'acide sulfurique ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) acide fort

- 3.5% d'acide acétique ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ ) acide faible
- 3.5% d'hydroxyde de sodium ( $\text{KOH}$ ) solution basique
- 3.5% de chlorure de sodium ( $\text{NaCl}$ ) solution saline

Après la conservation des éprouvettes dans les solutions qui doivent être renouvelées chaque 14 jours, on mesure la différence de masse (perte ou gain) par la formule suivante :

$$\text{Variation de la masse (\%)} = [(M1-M2) / M1] \times 100 (\%)$$

Avec :

M1 : masse de l'éprouvette avant l'immersion

M2 : masse de l'éprouvette après l'immersion.



**Figure III-39:** Conservation des éprouvettes dans les solutions chimiques.

#### k. Pénétration des ions chlorures

Les chlorures sont des ions négatifs nocifs pour les structures, le béton et les armatures. Les chlorures sont provenus soit des constituants des bétons ou de l'environnement qui l'entoure.

Concernant le cas de notre étude, des éprouvettes cubiques  $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$  ont été enrobées de paraffine des quatre faces latérales en laissant deux restantes (figure III-40). Cette méthode force la solution  $\text{NaCl}$  à adopter un chemin précis mesuré par la suite.

Le reste de cet essai consiste selon la norme **NF EN 12390-11** à immergées nos cubes pendant 120 jours dans la solution saline  $\text{NaCl}$  concentrée à 5%. Les éprouvettes sont ensuite coupées en deux puis on verse sur chaque section coupée une solution de nitrate d'argent  $\text{AgNO}_3$ . Après peu de temps on constate que 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-40:** Essai pénétration des ions chlorures.

### III.4. Conclusion

Dans ce chapitre on a présenté les points suivants :

- Le programme expérimental détaillé des deux campagnes : mortier et béton.
- La formulation des différents mélanges de mortier et de béton, les paramètres de composition ainsi que le mode de fabrication et de conservation des éprouvettes.
- L'ensemble des essais réalisés sur le mortier et le béton ainsi que les méthodes d'essais qui se résument à :

#### Programme expérimental réalisé sur mortier :

- Essai de consistance ;
- Essai de densité ;
- Essai d'air occlus ;
- Essai de rupture par flexion ;
- Essai de rupture par compression ;
- Essai d'absorption par immersion ;
- Essai d'absorption par capillarité ;
- Essai de résistance face aux attaques des solutions chimiques (HCl et H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) ;
- Essai pénétration des chlorures ;
- Essai de variation dimensionnelle (retrait et gonflement) ;
- Diffractométrie de rayons X (DRX).

#### Programme expérimental réalisé sur béton :

- Essai de consistance ;
- Essai de densité ;
- Essai de résistance à la traction par flexion ;
- Essai de résistance à la compression ;
- Essai de résistance à la compression obtenu par scléromètre ;
- Essai de résistance à la compression obtenu par ultrason ;
- Résistance obtenue par méthode combinée ;

- Essai d'absorption par immersion ;
- Essai d'absorption par capillarité ;
- Essai pénétration des chlorures ;
- Essai de résistance face aux attaques des solutions chimiques (HCl, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, KOH, CH<sub>3</sub>COOH et NaCl)

Les résultats obtenus des essais effectués et leurs interprétations seront présentés dans les Chapitres qui suivent.

**CHAPITRE IV : INFLUENCE DE LA SUBSTITUTION  
PARTIELLE DU CIMENT PAR LES CENDRES DE  
BOIS SUR LES PROPRIETES DU MORTIER**

## IV. Influence de la substitution partielle du ciment par les cendres de bois sur les propriétés du mortier

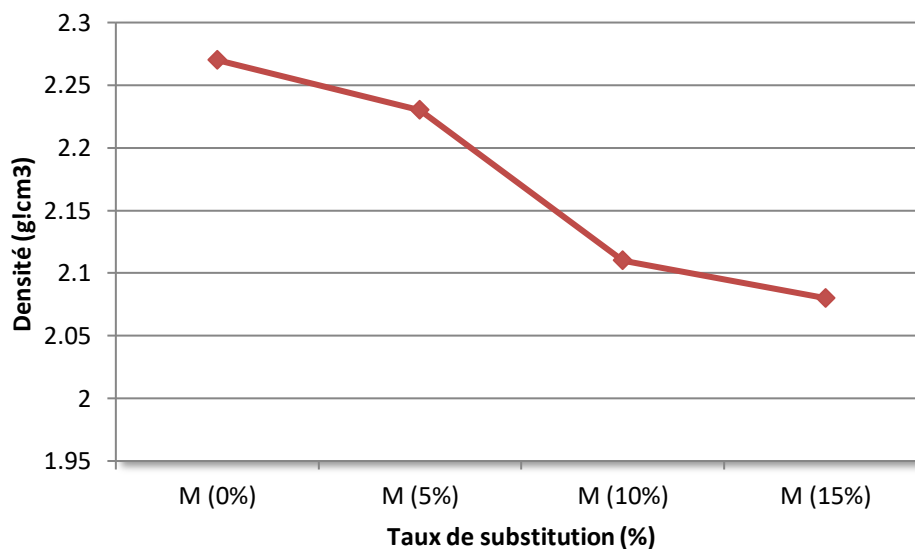
### IV.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous allons voir d'une manière détaillée les résultats obtenues des différents essais effectués sur le mortier. Les résultats à l'état frais (densité, ouvrabilité et air occlus) ainsi qu'à l'état durci (résistance à la compression, résistance à la traction par flexion, résistance faces aux chlorures, attaques chimiques, diffractométrie aux rayons X, variation dimensionnelle) seront illustrés et interprétés.

### IV.2. Influence de la substitution partielle du ciment par les cendres sur le mortier

#### IV.2. 1. Densité

La figure présente les résultats de mesure de densité pour le mortier témoin et avec des taux de substitutions variables. L'essai été effectué en pesant un moule vide d'un volume connu et le même rempli de mélange de mortier.

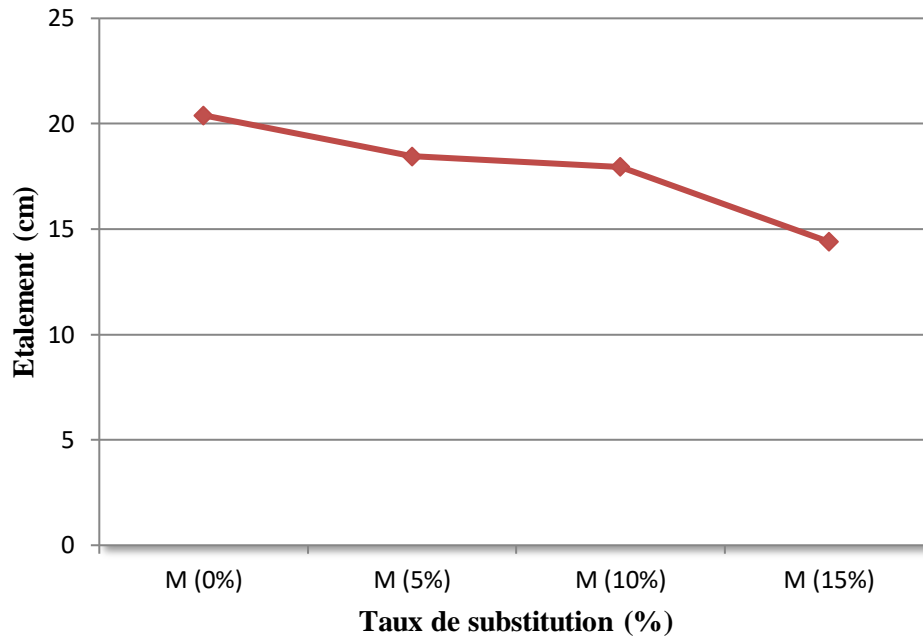


**Figure IV-1:** Variation de la densité en fonction du taux de substitution.

On peut constater que l'introduction des cendres de bois s'accompagne d'une baisse de densité, La valeur inférieure est observée pour le mélange avec 15% de cendres de biomasse, on a noté 2,08 g/cm<sup>3</sup>. Cette réduction est expliquée par la masse volumique absolue des cendres qui est inférieure à celle du ciment selon **Vu et al. (2019)**, ce qui nous donne un mortier moins dense que l'ordinaire. La même constatation été observée lors de la caractérisation des matériaux.

### IV.2. 2. Consistance

C'est un essai qui a pour but déterminé l'ouvrabilité du mortier, ce test est réalisé à l'aide d'un mini cône posé sur une table à secousse. A la fin, on mesure l'étalement de la galette obtenue. Les résultats de la consistance sont illustrés sur la figure 2.



**Figure IV-2:** Variation de la consistance en fonction du taux de substitution.

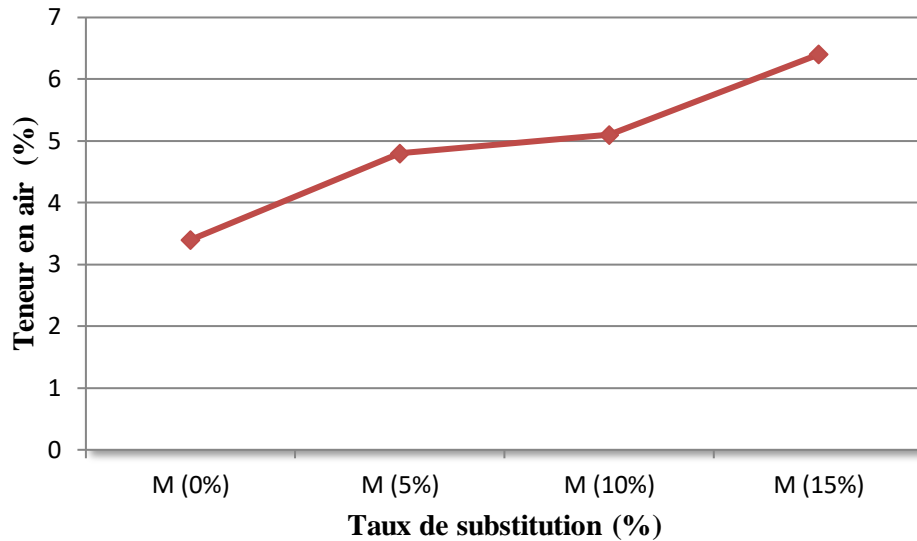
D'après la Figure 2, l'incorporation des cendres de biomasse entraîne une diminution de maniabilité quel que soit le taux de substitution. Les valeurs d'affaissement continuent à diminuer jusqu'à atteindre la valeur de 14,4 cm notée pour le dernier pourcentage (15 %).

Cette diminution des valeurs d'affaissement est justifiée par la teneur élevée en matière organique des cendres de bois disent **Chowdhury et al. (2015)**.

### IV.2. 3. Air occlus

L'air occlus dans les mélanges est mesuré à l'aide d'un aéromètre à mortier. On trouve les résultats détaillés sur la figure 3.

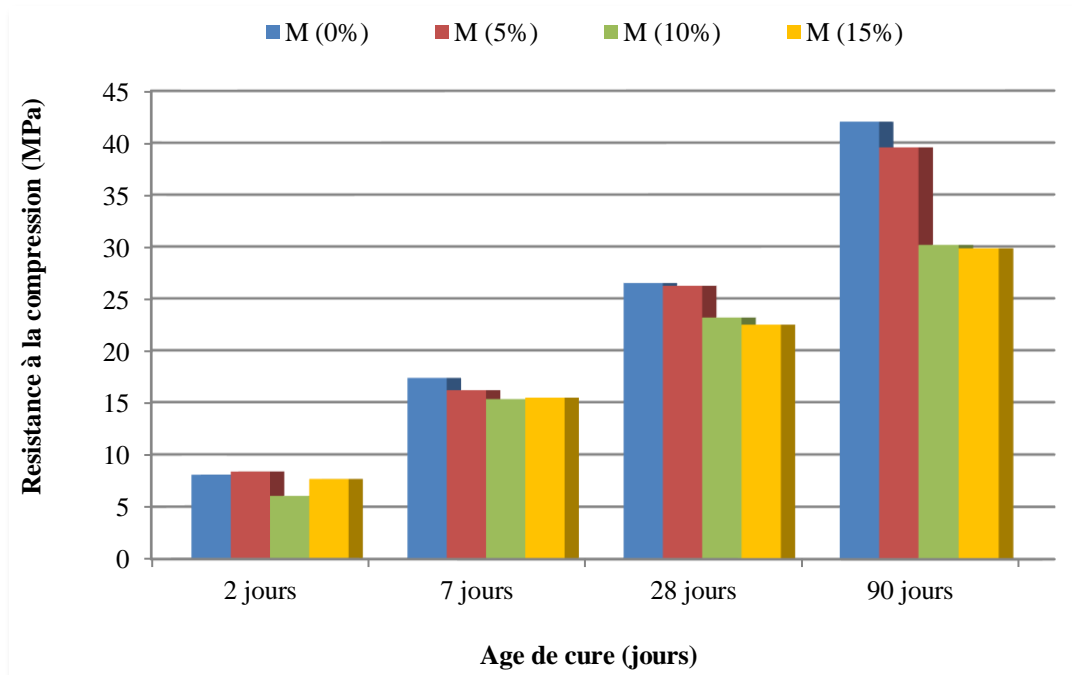
Nous pouvons observer que le remplacement du ciment par des cendres de biomasse conduit à une augmentation de la teneur en air occlus dans le mortier quel que soit le taux de substitution. Ce phénomène peut être expliqué par la porosité des particules de cendres et la morphologie irrégulière et non arrondie de ses particules selon l'étude publiée par **Ottosen et al. (2016)**, ceci peut se traduire par une quantité d'air supplémentaire dans nos mélanges de mortier.



**Figure IV-3:** Effet du taux de substitution sur la variation de l'air occlus.

#### IV.2. 4. Résistance à la compression

La résistance à la compression des mortiers a été déterminée à l'âge de 2, 7, 28 et 90 jours, les résultats sont présentés sur la figure ci-dessous.



**Figure V-4:** Influence du taux de substitution sur la résistance à la compression.

Au jeune âge (2 jours), le mortier avec 5% de cendre de bois montre la meilleure résistance à la compression. Selon **Akeem et al. (2013)**, ce phénomène peut s'expliquer par la réaction chimique de la cendre de bois avec l'hydroxyde de calcium libéré lors de l'hydratation.

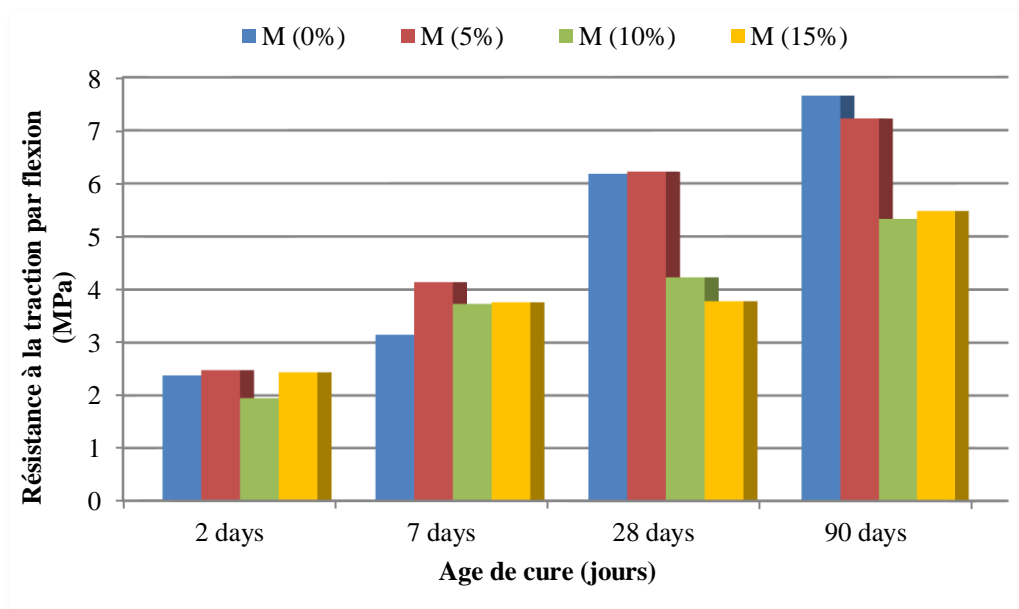
L'évolution de la résistance à la compression des échantillons de mortier étudiés augmente régulièrement avec le temps, cependant, les mélanges à base de cendres de biomasse marquent une diminution résistance à partir de 7 jours mais les valeurs restent acceptables, ces résultats sont cohérence avec ceux trouvés par **Subramaniam et al. (2015)**.

A long terme, après 90 jours de cure, les valeurs du mortier témoin restent en tête (42,01 MPa) et dépassent les résistances des mélanges à base de cendres de biomasse à l'exception du pourcentage 5% qui reste proche.

Ces constatations sont dues à l'influence de la réaction pouzzolanique des cendres de bois qui est moins prédominante que le ciment à long terme. Ce qui mène à une hydratation moins intense. D'un autre coté et comme vu précédemment le ciment en association avec les cendres de bois, donne un mortier moins dense, moins compacte et plus poreux et par conséquent un mortier moins résistance.

#### IV.2. 5. Résistance à la traction par flexion

La résistance à la traction par flexion des mortiers a été déterminée à l'âge de 2, 7, 28 et 90 jours, les résultats sont présentés sur la figure 5.



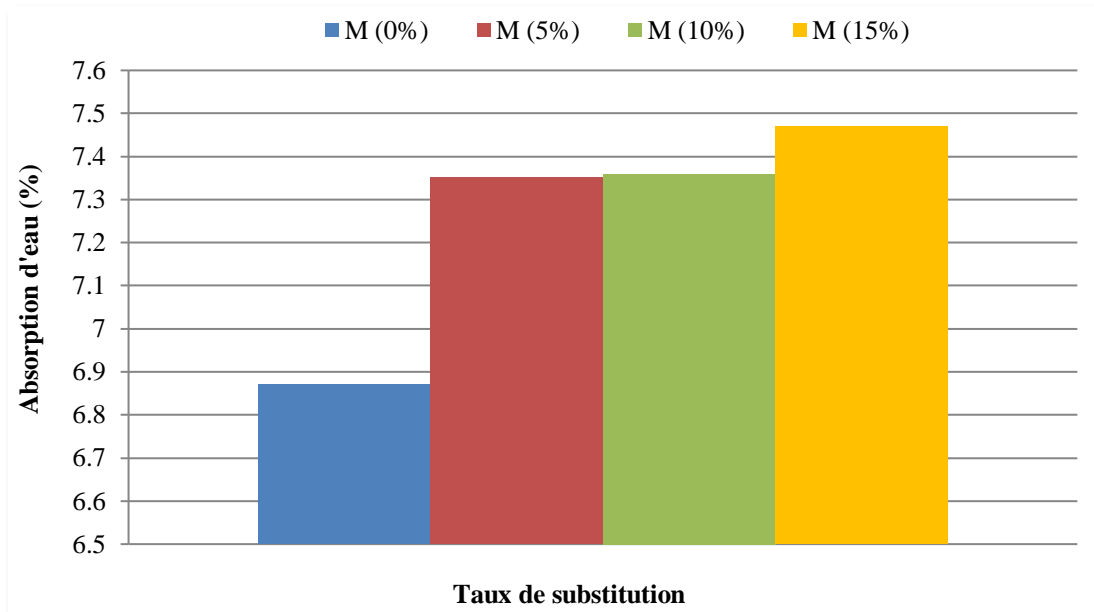
**Figure IV-5:** Influence du taux de substitution sur la résistance à la traction par flexion.

La Figure 5 montre que l'incorporation de 5% de cendre de bois dans le mortier améliore la résistance à la traction par flexion à l'âge de 2, 7 et 28 jours. Des résultats similaires sont observés dans l'étude publiée par **Vaishali et al. (2012)**, ce comportement peut être expliqué par la quantité de chaux (CaO) présente dans les cendres de biomasse qui augmente la cohésion entre la matrice cimentaire et le squelette granulaire et augmente par conséquent la résistance à la traction en flexion.

A long terme (90 jours) le mortier témoin marque la valeur la plus élevée par rapport à ceux contenant des cendres mais les valeurs restent acceptables.

### IV.2. 6. Absorption d'eau par immersion

La figure 6 présente les résultats de l'essai absorption d'eau par immersion.



**Figure IV-6:** Variation de l'absorption en fonction du taux de substitution.

En analysant les résultats présentés sur la Figure 6, nous pouvons dire que l'absorption d'eau par l'immersion augmente proportionnellement avec l'augmentation des niveaux de cendres de la biomasse incorporés. On note le coefficient d'absorption ( $A_b$ ) minimale pour mortier témoin tandis que le mélange à base de 15% de cendre de biomasse atteint jusqu'à 7,47% d'absorption d'eau par immersion.

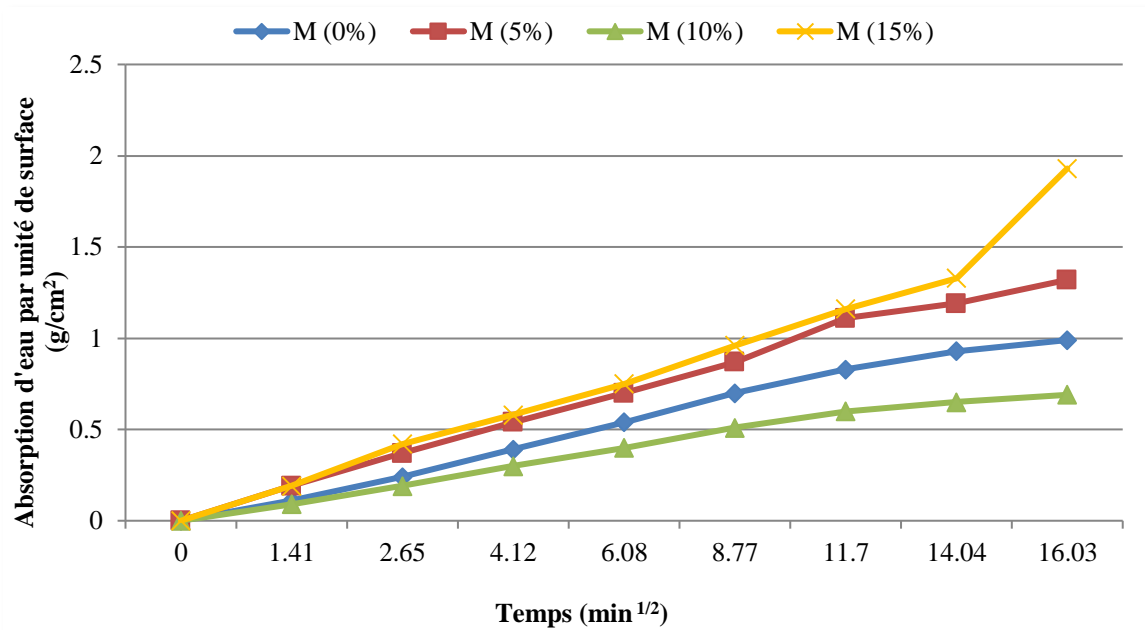
Ces résultats sont conformes à ceux trouvés par les chercheurs **Vu et al. (2019)**. Ces observations peuvent être expliquées par la nature de la cendre de bois, ce matériau organique et poreux a tendance à absorber plus d'eau que le ciment.

### IV.2. 7. Absorption d'eau par capillarité

Cette caractéristique reflète la quantité d'eau qui peut être absorbée par la pierre lorsqu'une seule face de l'élément est en contact avec l'eau. Les résultats sont affichés sur la Figure 7.

Selon la Figure 7, l'absorption d'eau par capillarité augmente proportionnellement avec le temps, la valeur maximale est donnée pour le mortier contenant 15% de cendres de biomasse. D'après Fusade et al. (2019), la cendre de bois fait partie des matériaux hygroscopiques, ce qui confère au mortier la capacité d'absorber plus d'eau par capillarité.

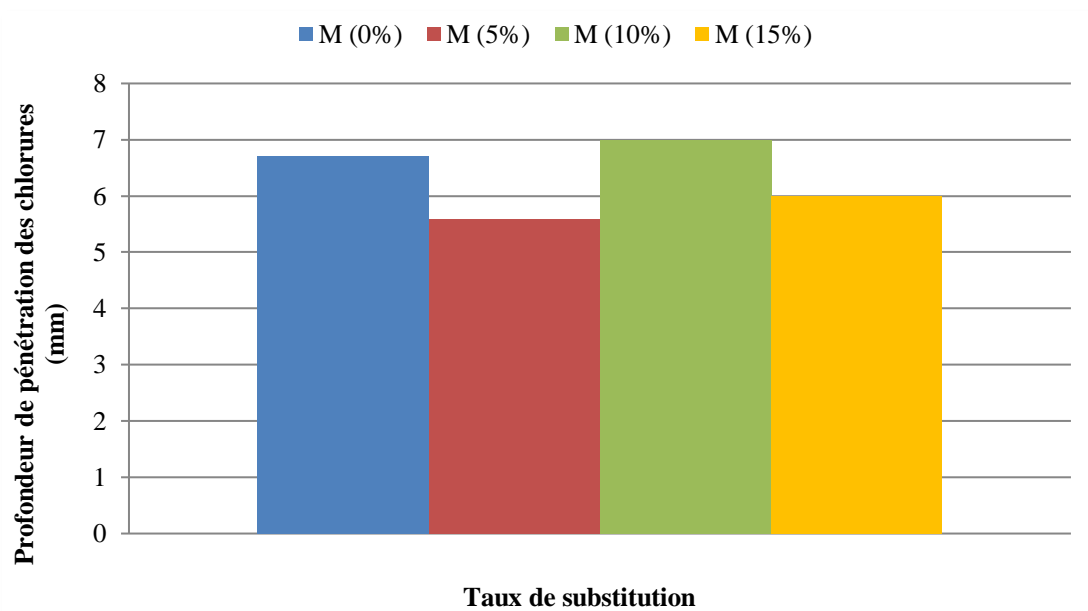
Arrivons à la fin de l'essai, le mortier à base de 10% d'ajout cendre marque la valeur minimale, donc on peut dire que les résultats ont une tendance non-linéaire.



**Figure IV-7:** Influence du taux de substitution sur l'absorption d'eau par capillarité.

#### IV.2. 8. Pénétration des ions chlorure

Après la cure dans à l'eau, les échantillons ont été conservés dans une solution de chlorure de sodium (NaCl) concentrée de 5% pendant 28 jours.



**Figure IV-8:** Variation de la profondeur de pénétration de chlorure en fonction du taux de substitution.

Après la conservation dans la solution saline (NaCl), une variation non linéaire de profondeur de pénétration de chlorure peut être remarquée.

Selon la Figure 8, on peut constater que le mortier à base de 5% d'ajout de cendres à montrer de meilleures performances en termes de résistance face aux agressions des ions chlorure. Les autres niveaux de substitutions restent acceptables et dans les normes.

La résistance face aux chlorures, donne une mesure indirecte de la perméabilité du béton et de sa structure poreuse interne affirment **Khandaker et al. (2006)**.

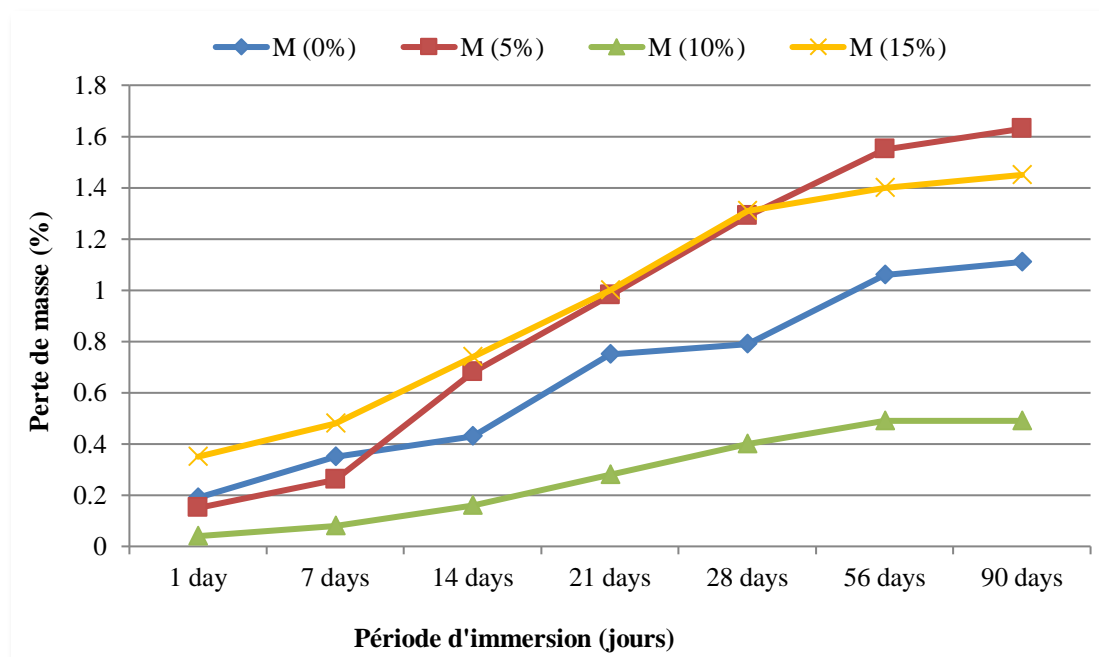
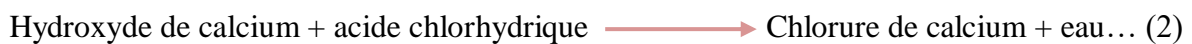
## IV.2. 9. Attaques chimiques par les acides

### IV.2. 9.1. Attaque chimique par l'acide chlorhydrique (HCL)

Tous les mélanges sans exception subissent une perte de masse permanente mais modérée (Figure 9); les mêmes résultats ont été trouvés par les scientifiques **Mambou et al. (2019)**.

En termes de masse perte, le mortier avec 10% d'addition de cendre a montré une meilleure performance et s'est dégradé le moins. Cette perte de masse est due au fait que le ciment portland après hydratation, libère de l'hydroxyde de calcium libre  $\text{Ca(OH)}_2$  qui peut s'écouler intérieurement, lorsqu'il est exposé à une attaque par un acide (**Kazi et al. 2017**). La force de cette attaque dépend de la qualité et de la perméabilité du mortier.

Quand le mortier rentre en contact avec l'acide chlorhydrique HCL (Figure 10), ce dernier réagit avec l'hydroxyde de calcium  $\text{Ca(OH)}_2$  pour former le chlorure de calcium  $\text{CaCl}_2$  qui détériore les éprouvettes, entraînant une perte de masse (**Mouli et al. 2010**) selon la formule suivante (**Khandaker et al. 2006**) (eq 1 et 2) :



**Figure IV-9: Perte de masse en fonction de la période d'immersion dans 5% de HCL.**

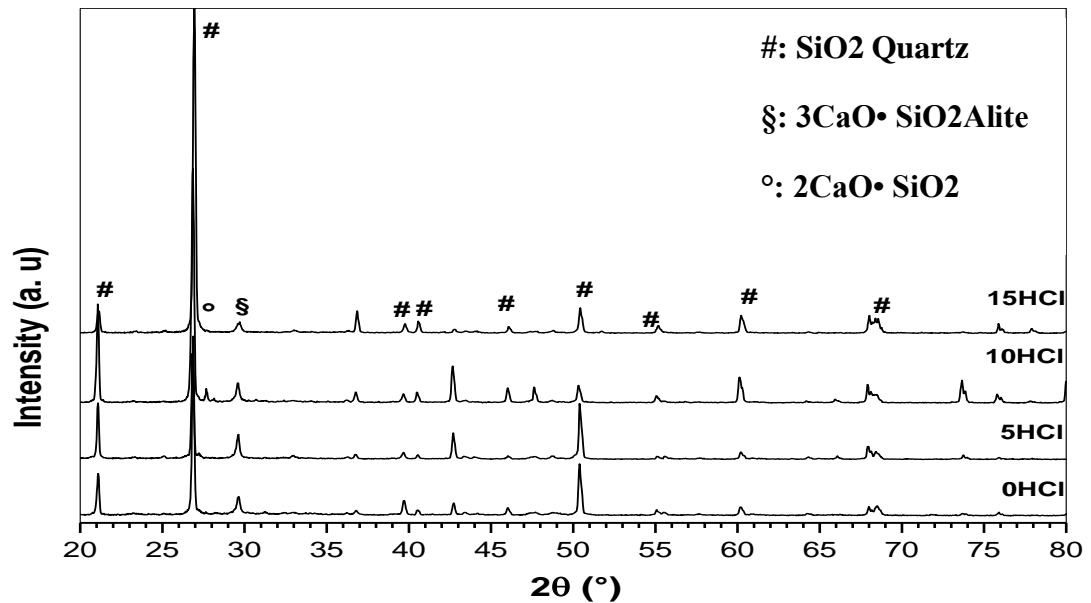


Figure IV-10: Diffractométrie de rayons X (DRX) des échantillons immergées dans 5% de HCL.

#### IV.2. 9.2. Attaque chimique par l'acide sulfurique ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ )

La figure 11 montre que l'incorporation de 5% et 10% de cendres de biomasse entraîne une diminution en termes de perte de masse des éprouvettes immergées dans l'acide  $\text{H}_2\text{SO}_4$ . L'acide sulfurique est un acide inorganique fort dont l'effet destructeur est dû aux ions sulfate. Sa sévérité augmente avec sa concentration et le temps.

Quand le mortier rentre en contact avec l'acide sulfurique  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , l'hydroxyde de calcium  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  (portlandite) réagit avec l'acide sulfurique pour former des sulfates de calcium  $\text{CaSO}_4$  (eq 1 et 2) qui se sont déposés comme gypse comme le montre la figure 12. La couche de gypse précipité est facilement écoulee dont le résultat est une perte de masse considérable

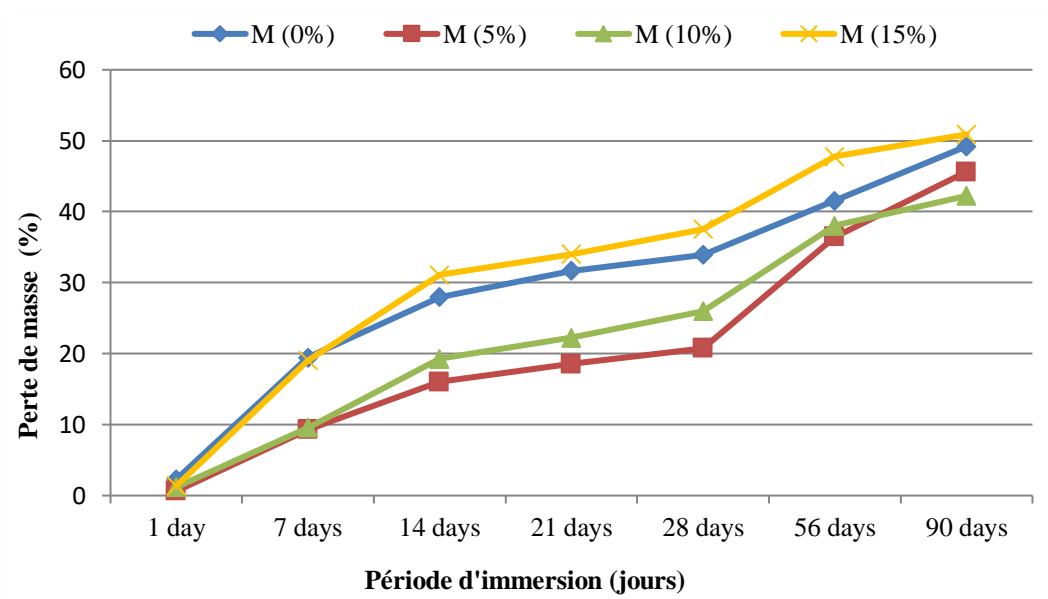


Figure IV-11: Perte de masse en fonction de la période d'immersion dans 5% de  $\text{H}_2\text{SO}_4$ .

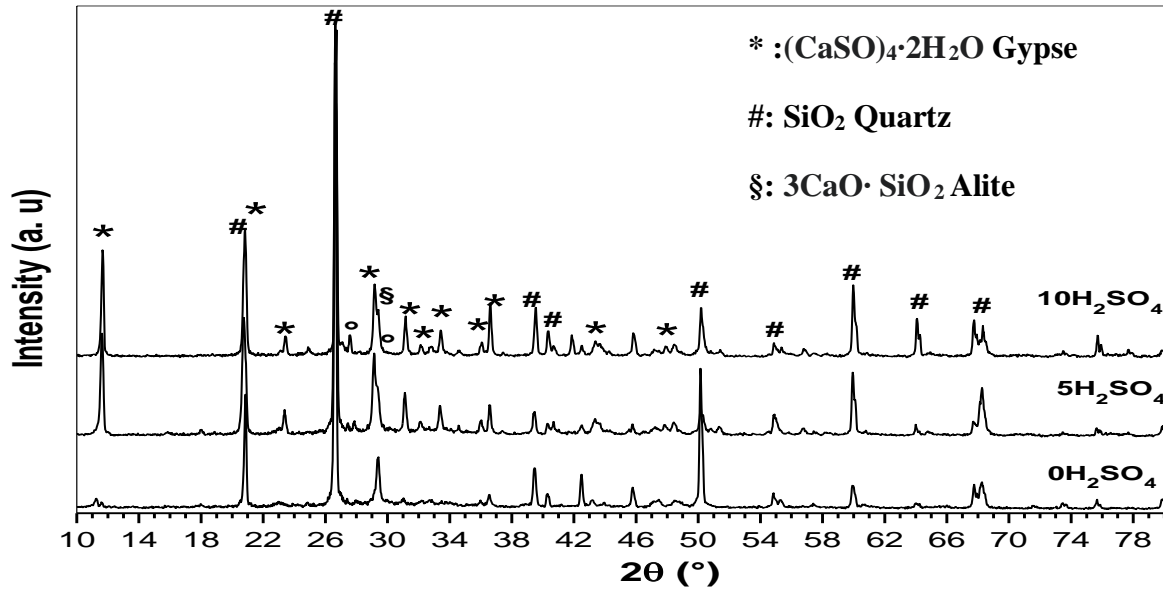


Figure IV-12: Diffractométrie de rayons X (DRX) des échantillons immergées dans 5% de  $\text{H}_2\text{SO}_4$ .



Hydroxyde de calcium + acide sulfurique  $\longrightarrow$  sulfate de calcium + eau ... (2)

Le gypse déposé est ensuite lessivé, ce qui nous donne une solution blanchâtre. (Mouli et al. 2010). Après la dégradation chimique, on observe que l'échantillon a eu non seulement une augmentation de porosité mais aussi une diminution de volume et de masse.

#### IV.2. 10. Variation dimensionnelle

#### IV.2. 11. Retrait

L'objectif de cet essai est de mesurer, en fonction du temps, la variation de longueur due aux effets de l'hydratation et de dessiccation des matériaux cimentaires.

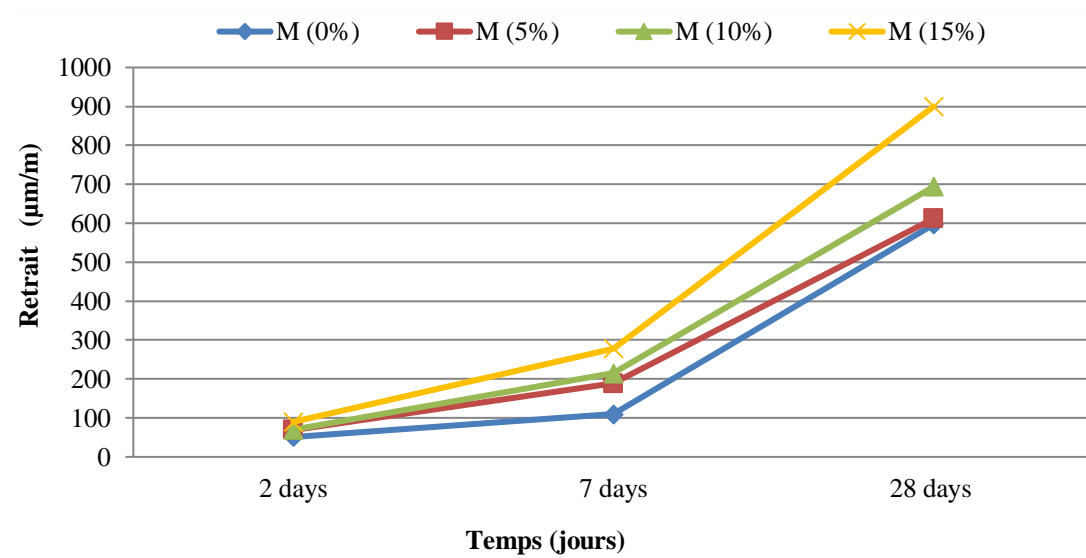


Figure IV-13: Variation du retrait total en fonction du temps et du taux de substitution.

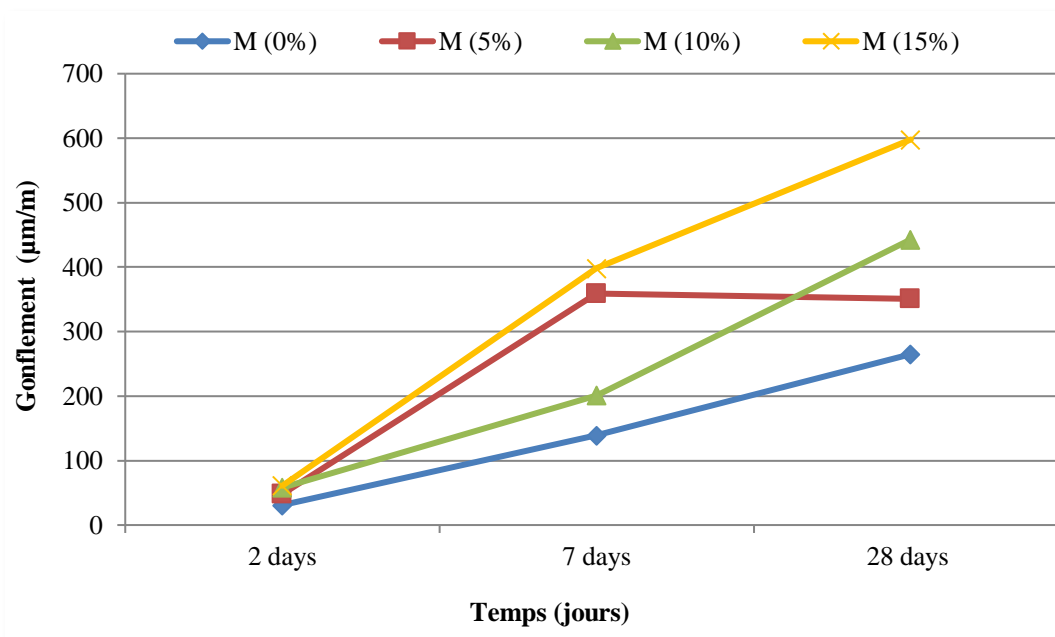
L'analyse des résultats de la stabilité dimensionnelle (Figure 13), montre des comportements différents du retrait en fonction du taux de substitution ; les mortiers contenant des cendres de biomasse présentent des valeurs de retrait plus élevées que celles enregistrées pour le mortier témoin.

En effet, le retrait augmente proportionnellement avec l'âge du mortier, ceci est dû à l'hydratation du ciment qui génère un fin réseau de pores capillaires.

Ce phénomène s'est accentué et devient plus remarquable au niveau des échantillons contenant des cendres par rapport au mortier témoin. Selon **Habeeb et al. (2009)**, l'ajout de matériaux micro fins tels que les cendres peuvent accentuer le phénomène de retrait.

#### IV.2. 12. Gonflement

D'après la figure 14, on peut voir que les valeurs de gonflement évoluent avec le temps et le taux de substitution. Cette variation de volume (gonflement), est due à la consommation de la portlandite  $\text{Ca(OH)}_2$  et de la combinaison de l'oxyde de magnésium et de la l'épuisement de la chaux libre pendant les réactions d'hydratation avec l'adjuvant incorporé dans le ciment (**Kleib 2018**).



**Figure IV-14:** Variation du gonflement en fonction du temps et du taux de substitution.

#### IV.3. Conclusion

Après l'analyse des résultats obtenus, on peut conclure que :

- L'introduction de cendres de bois entraîne une diminution de la densité, ce qui peut être bénéfique dans certains cas tels que les structures légères et les structures isolantes.
- L'utilisation de cendres de biomasse a tendance à diminuer l'ouvrabilité
- L'introduction des cendres de biomasse influe sur la quantité d'air occlus.

- Le mortier contenant 5 % de cendres de bois présente la meilleure résistance à la compression au jeune âge.
- L'ajout de 5% de cendres de bois améliore la résistance à la traction par flexion à l'âge de 2, 7 et 28 jours.
- L'incorporation des résidus cendres augmentent l'absorption par immersion du mortier.
- L'introduction de cendre de bois entraîne une augmentation de l'absorption capillaire des mélanges.
- Le mortier contenant 5% de cendres de bois est le plus résistant face à la pénétration des chlorures.
- Le mélange contenant 10% de cendres de biomasse est le plus résistant face aux attaques de l'acide chlorhydrique (HCL).
- Les mélanges contenant 5% et 10% d'ajout de cendres montrent une meilleure performance dans l'acide sulfurique ( $H_2SO_4$ ) et perdent le moins de masse.
- La combinaison ciment-cendres influe sur le retrait.
- L'introduction des cendres de bois influe sur le gonflement.

D'une manière générale, on peut conclure que la valorisation des cendres de bois dans le mortier améliore certaines caractéristiques et a un impact négatif sur d'autres, comme pour la valorisation de tous les déchets.

Le reste des résultats sera présenté et interprété dans le chapitre suivant.

**CHAPITRE V : INFLUENCE DE LA SUBSTITUTION  
PARTIELLE DU CIMENT PAR LES CENDRES DE  
BOIS SUR LES PROPRIETES DU BETON**

## V. Influence de la substitution partielle du ciment par les cendres de bois sur les propriétés du béton

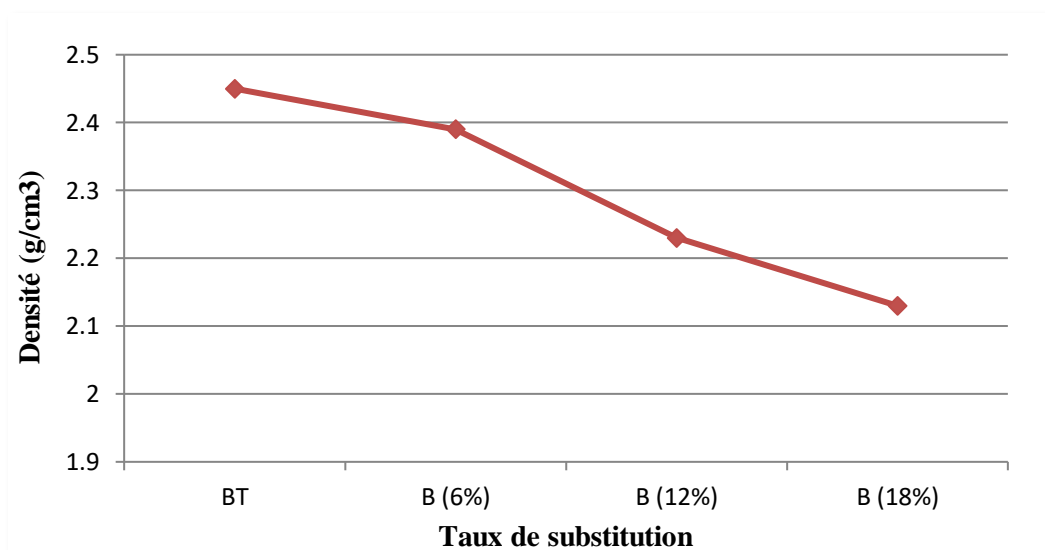
### V.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous allons voir d'une manière détaillée les résultats obtenues des différents essais effectués sur le béton. Les résultats à l'état frais (densité et ouvrabilité) ainsi qu'à l'état durci (résistance à la compression, résistance à la traction par flexion, résistance au scléromètre, résistance aux ultras son, méthode combinée, résistance faces aux chlorures et attaques chimiques) seront illustrés et interprétés.

### V.2. Influence de la substitution partielle du ciment par les cendres sur le béton

#### V.2.1. Densité

La figure présente les résultats de mesure de densité pour le béton témoin et avec des taux de substitutions variables. L'essai été effectué en pesant un moule vide d'un volume connu et le même rempli de mélange de béton hydraulique.



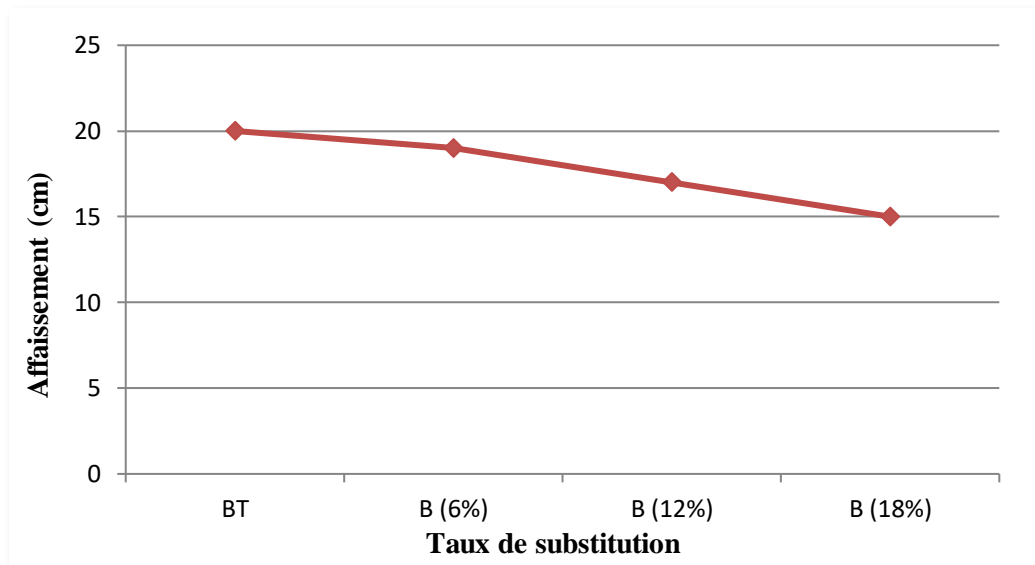
**Figure V-1:** Influence de l'introduction des cendres sur la densité.

L'analyse de la figure 1 montre que l'introduction des cendres de bois engendre une diminution de densité, la valeur maximale est donnée pour le mortier témoin tandis que la valeur minimale est notée pour le mélange contenant 18% de cendres. Selon **Batt et al. (2017)** cette observation est expliquée par le poids spécifique inférieur des cendres de bois, ce qui nous donne un béton plus léger que le béton conventionnel.

#### V.2.2. Ouvrabilité

D'après la figure 2, l'ouvrabilité du béton diminue avec l'augmentation de sa teneur en cendres, le béton témoin marque la valeur maximale d'affaissement tandis que le mélange avec 18% de cendre marque la valeur minimale de 15 cm. Ces résultats se coïncident avec ceux énoncés par **Amrutha et al. (2016)**.

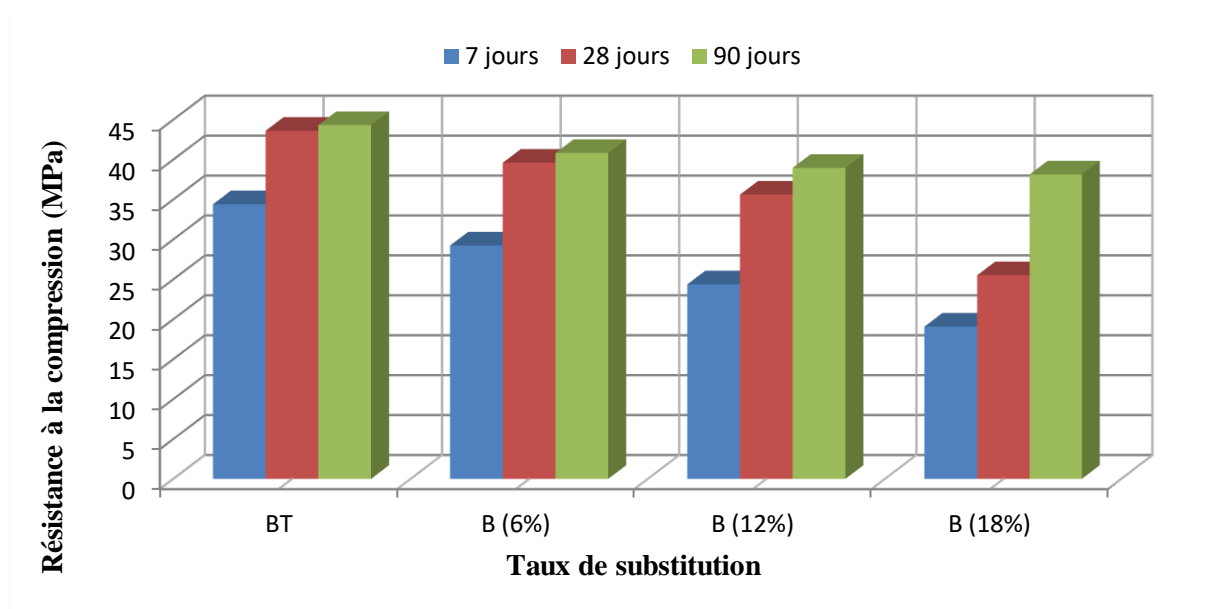
Cette décroissance de maniabilité est justifiée selon **Zhifu et al. (2016)**, par la teneur élevée en carbone non brûlé dans les cendres de bois, ce qui confère à ce résidu l'aptitude d'absorber plus l'eau, ce qui réduisait par conséquent la teneur en eau libre dans les mélanges.



**Figure V-2:** Variation de l'ouvrabilité en fonction du taux de substitution.

### V.2.3. Résistance à la compression

La résistance à la compression du béton hydraulique a été déterminée à l'âge de 7, 28 et 90 jours, les résultats sont présentés sur la figure ci-dessous.



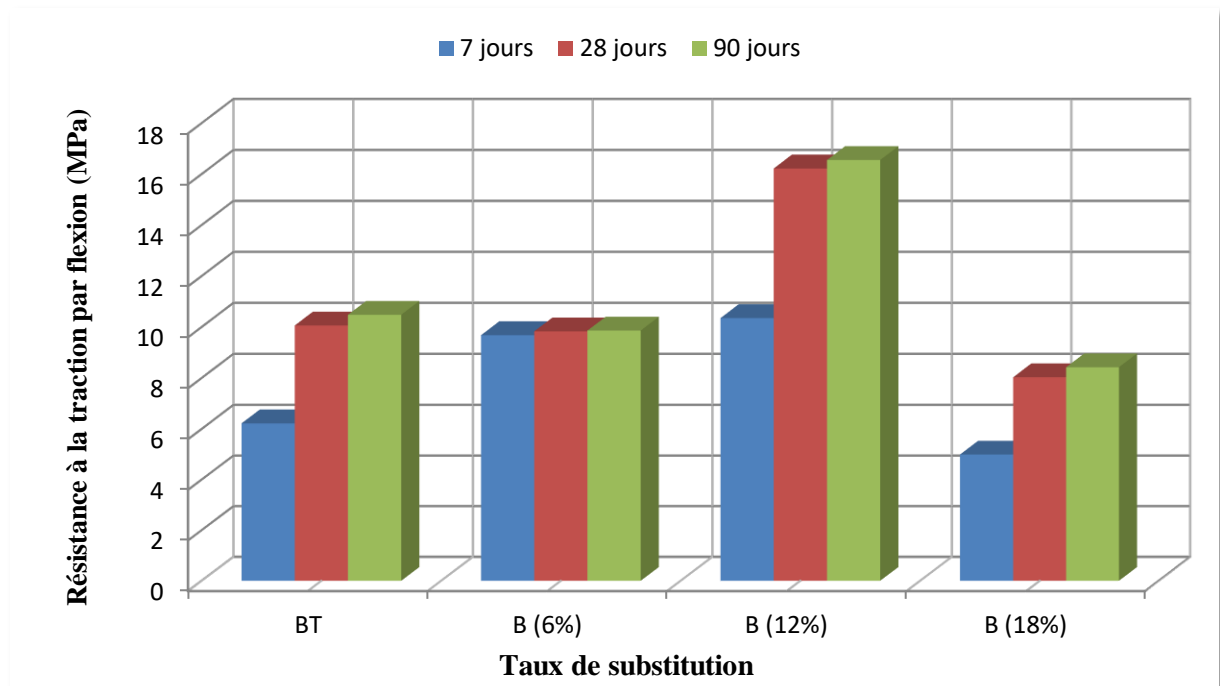
**Figure V-3:** Influence du taux de substitution sur la résistance en compression.

La résistance à la compression augmente au fur et à mesure avec le temps mais diminue avec l'augmentation de la teneur en cendres (figure 3), ces résultats sont en cohérence avec ceux trouvés par **Marthong (2012)**.

L'explication possible de cette tendance est que la cendre de bois agit plus comme un filler que comme un liant dans la matrice cimentaire (**Vaishali 2012**). Cette tendance peut aussi être expliquée par la faible réaction pouzzolanique des cendres de biomasse en comparaison avec le ciment mais les résultats restent acceptables. La résistance à la compression du béton à base de 18% de cendres dépasse les 38 MPa à l'âge de 90 jours.

#### V.2.4. Résistance à la traction par flexion

La résistance à la traction par flexion du béton hydraulique a été déterminée à l'âge de 7, 28 et 90 jours, les résultats sont présentés sur la figure 4.



**Figure V-4:** Influence du taux de substitution sur la résistance en traction par flexion.

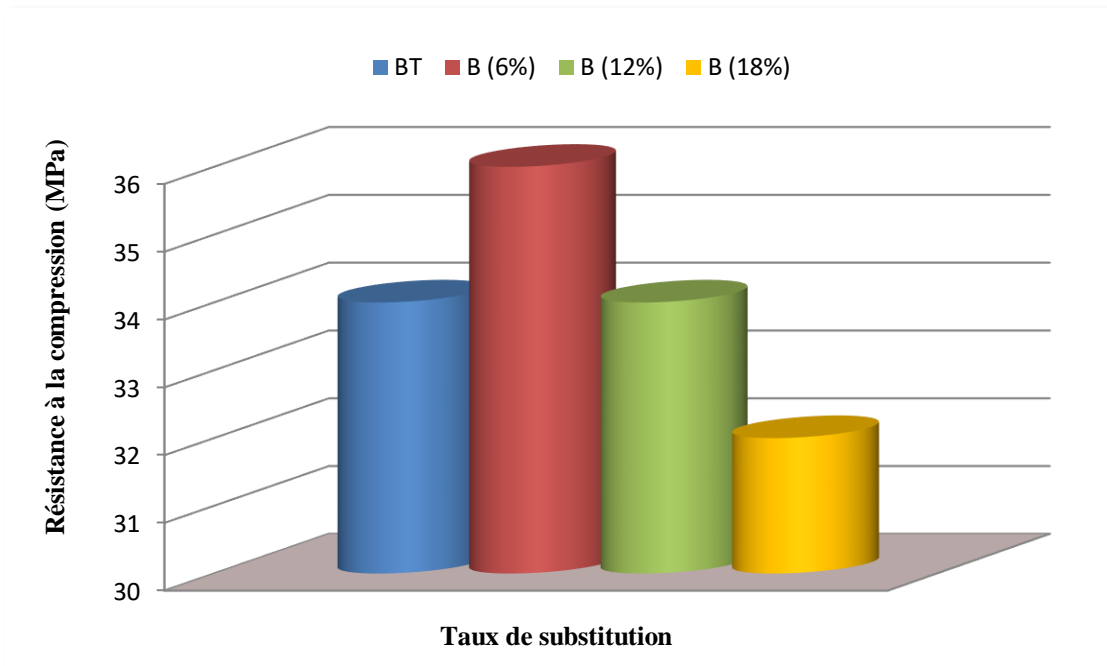
La figure 6 indique que l'introduction de 12% de cendres de bois améliore la résistance à la traction par flexion à l'âge de 7, 28 et 90 jours.

D'après **Vaishali (2012)**, les particules de cendres améliorent la microstructure du ciment. Autrement dit la finesse des particules de cendres de biomasse (surface spécifique de Blaine) est inférieure à celle du ciment ce qui favorise la cohésion entre la matrice cimentaire et le squelette granulaire et par conséquent augmente la résistance à la traction par flexion.

#### V.2.5. Résistance en compression obtenue par l'essai scléromètre

La résistance à la surface donnée par le scléromètre est présentée sur la figure 5.

Sur la figure 5, on constate que la dureté et la résistance à la surface sont plus élevées dans le béton avec 6% de cendres de biomasse, ceci est principalement dû à la morphologie des particules de cendres.

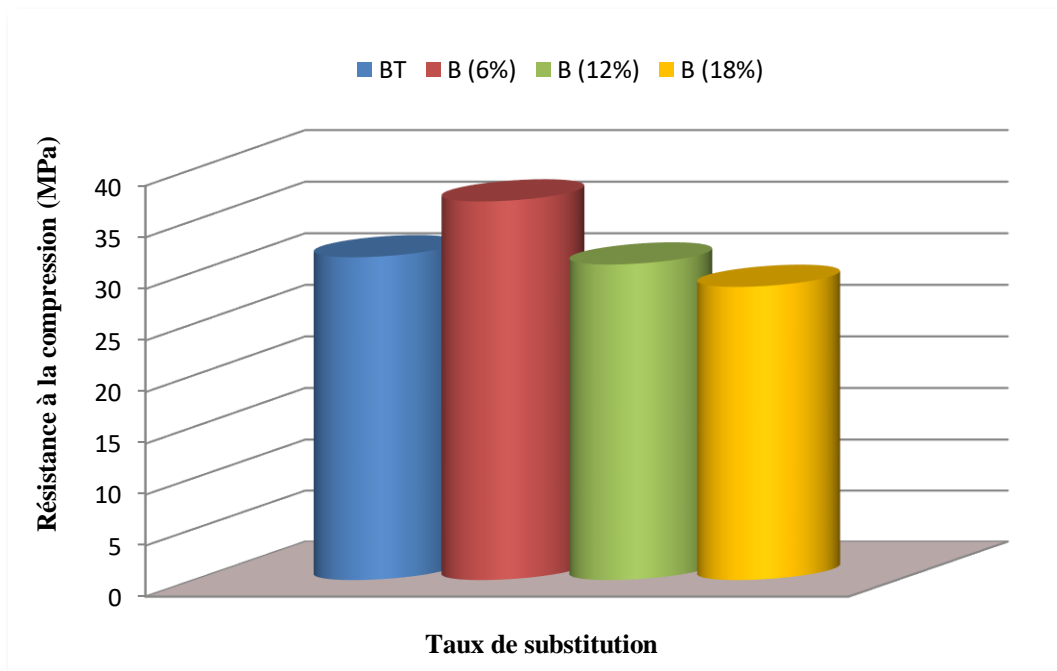


**Figure V-5:** Résistance en compression obtenue par scléromètre.

Selon **Vytautas et al. (2014)** leur diamètre est inférieur à 63  $\mu\text{m}$  et jouent le rôle d'un micro-filler, ceci augmente l'adhésion entre les constituants du béton ce qui offre une résistance meilleure à la surface.

#### V.2.6. Résistance à la compression obtenue par ultrason

On présente sur la figure 6 les résultats des essais ultrasoniques des différents taux de substitution



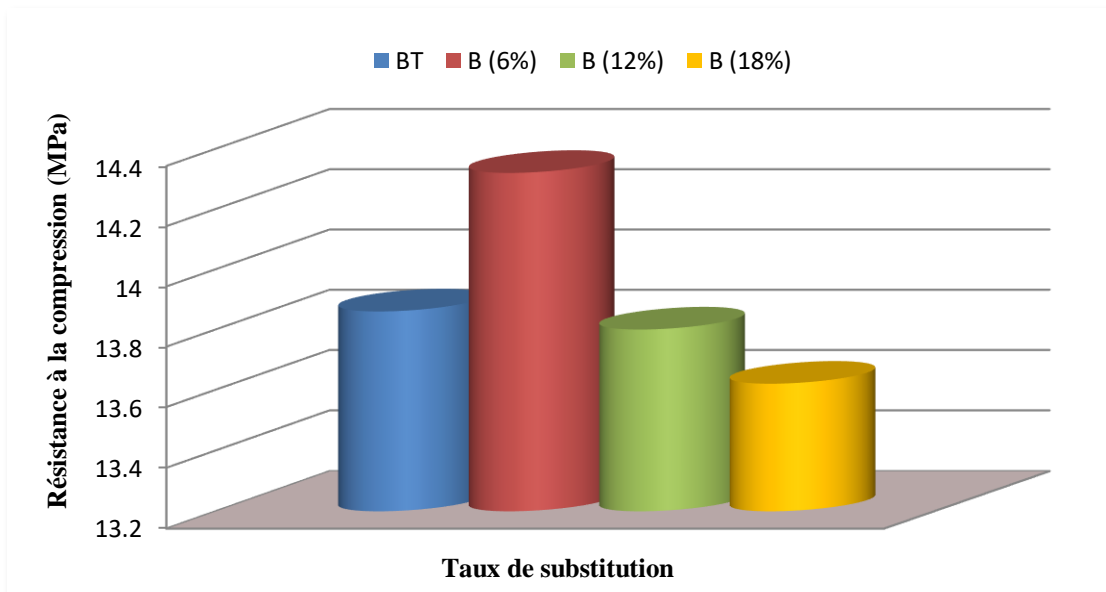
**Figure V-6:** Résistance en compression obtenue par ultrason.

La figure 6 indique que la résistance à la compression obtenue par ultrason est la même obtenue à l'aide du scléromètre où le béton à base de 6 % de cendres marque le meilleur résultat. L'introduction de la cendre améliore la microstructure et l'homogénéité du béton.

Ceci est peut-être dû à la finesse des particules de cendre en comparant avec celle du ciment ce qui influe d'une manière appréciable sur la résistance du béton **Marthong (2012)**.

### V.2.7. Combinaison ultrason/scléromètre

Les résultats de la combinaison ultrason/scléromètre des différents mélanges de béton hydraulique sont illustrés sur la figure ci-dessous.



**Figure V-7:** Résistance à la compression obtenue par la méthode combinée.

On remarque le même comportement comme vu précédemment aux résistances obtenues par scléromètre et ultrason (figure 7), le béton contenant 6% de cendres de biomasse marque la meilleure résistance avec la méthode combinée.

### V.2.8. Absorption d'eau par immersion

D'après la figure 8, l'absorption d'eau par immersion des mélanges augmente avec le temps et avec l'augmentation de leur teneur en cendres, ces résultats ne sont pas en cohérence avec ceux trouvés par **Subramaniam et al. (2015)**, ceci peut être expliqué par les propriétés physico-chimiques des cendres qui se diffèrent d'un échantillon à un autre, ces propriétés dépendent à plusieurs facteurs comme la nature de l'espèce végétale brûlée, la technique et la température d'incinération.

L'absorption d'eau élevée est due à la teneur élevée des cendres en matières organiques ce qui confère au béton l'aptitude d'absorber plus d'eau par immersion ; des résultats similaires sont observés dans l'étude élaborée par **Swaptik et al. (2015)**.

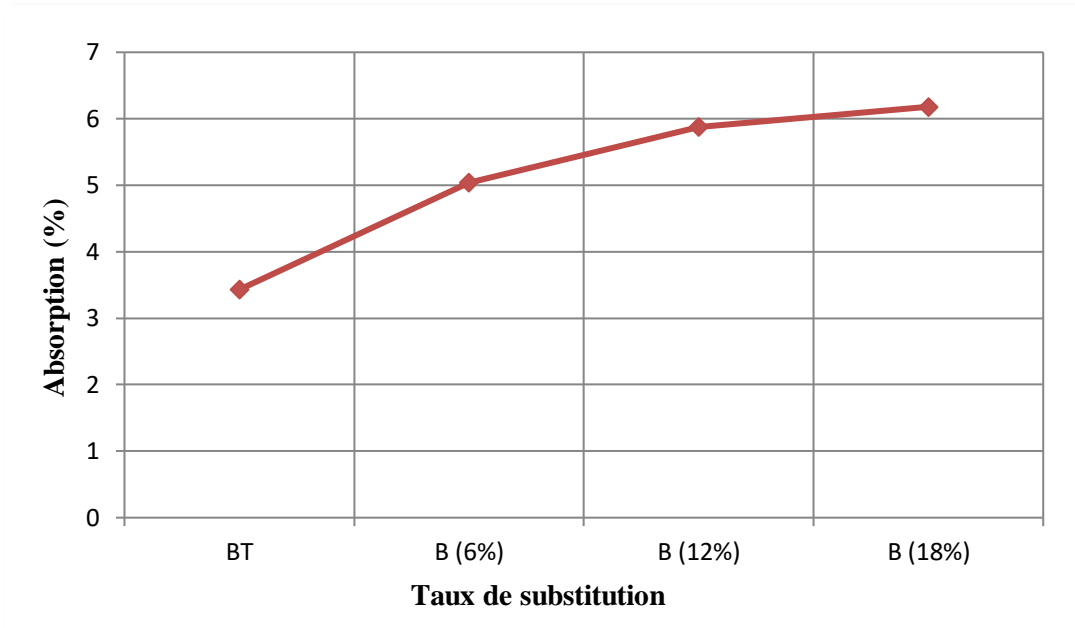


Figure V-8: Variation de l'absorption par immersion en fonction du taux de substitution.

### V.2.9. Absorption d'eau par capillarité

Cette caractéristique reflète la quantité d'eau qui peut être absorbée par la pierre lorsqu'une seule face de l'élément est en contact avec l'eau. Les résultats sont affichés sur la Figure 9.

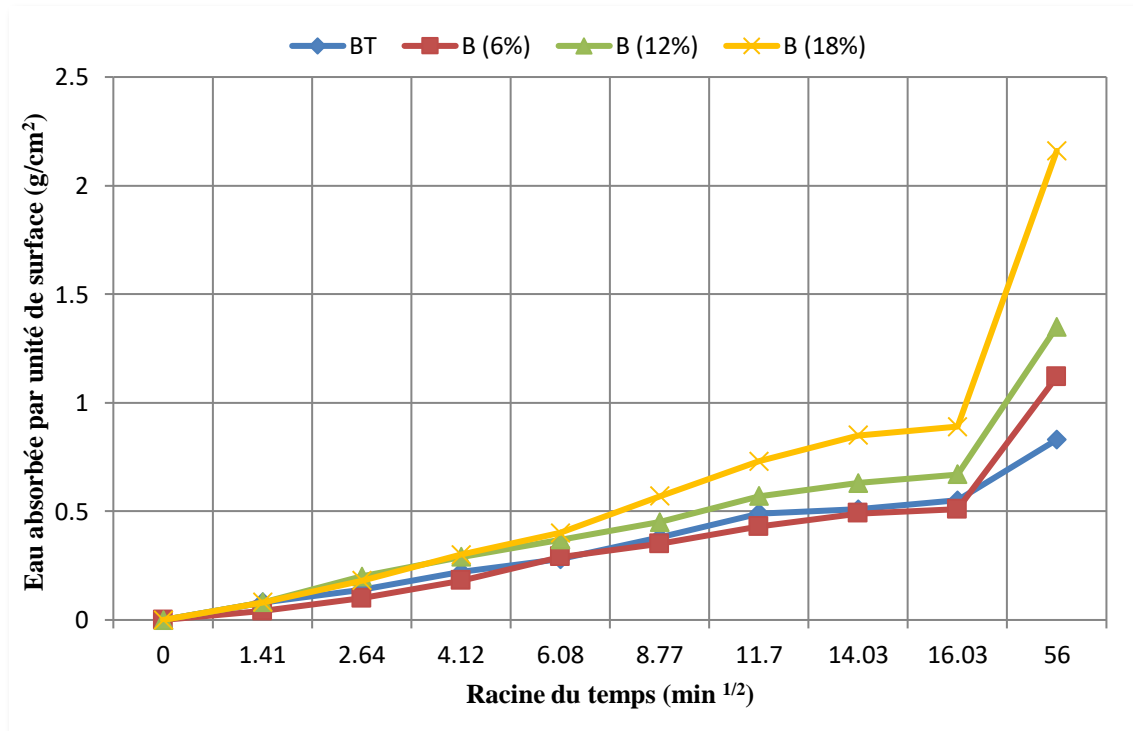


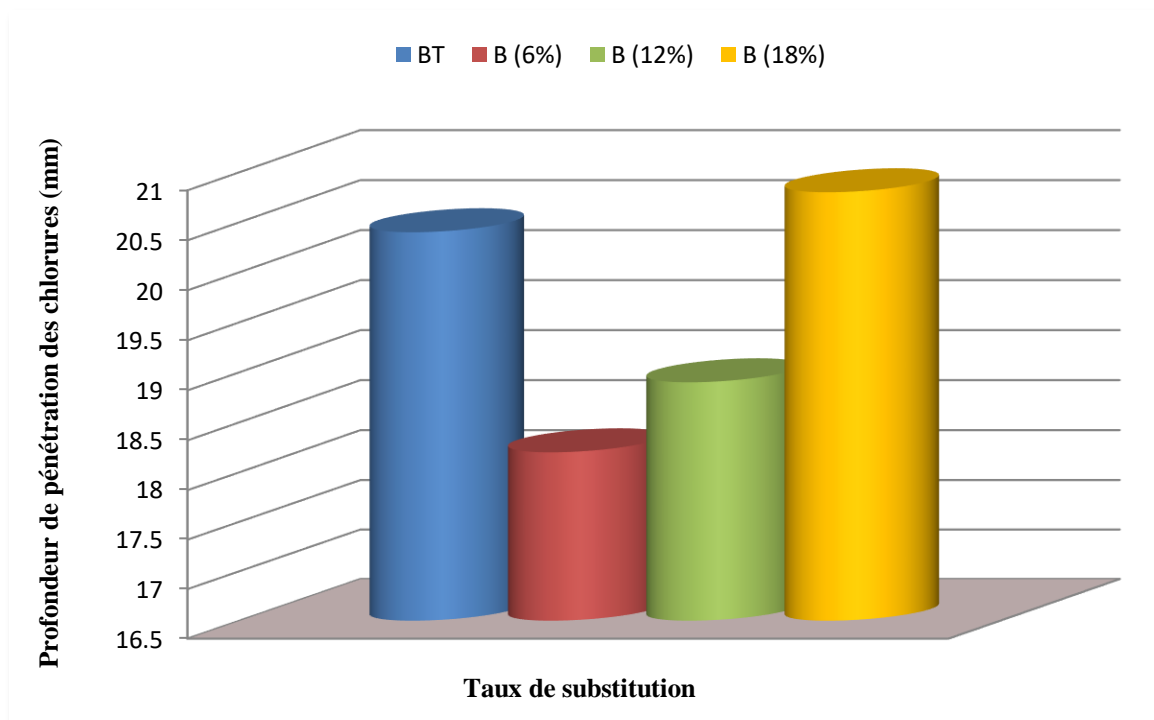
Figure V-9: Variation de l'absorption par capillarité en fonction de la racine carrée du temps.

Comme illustré sur la figure 9, l'absorption d'eau par capillarité du béton hydraulique augmente proportionnellement avec le temps et avec la teneur en cendre ; la capacité d'absorption optimale est notée pour le mélange à base de 18% de cendre de biomasse.

D'après **Barićević et al. (2021)**, qui ont introduit les cendres de biomasse dans le mortier, l'addition de ces cendres peut affecter la porosité de la microstructure, entraînant une absorption capillaire plus élevée ; selon **Fusade et al. (2019)**, les cendres de bois font partie des matériaux hygroscopiques, ce qui attribue aux mélanges l'aptitude d'absorber plus d'eau par capillarité.

#### V.2.10. Pénétration des chlorures

Cette partie de l'étude comprend la détermination de la profondeur de pénétration des chlorures sur des éprouvettes de béton immergées pendant 120 jours dans la solution saline (NaCl). La profondeur de pénétration est déterminée par la méthode calorimétrique à l'aide de l'indicateur Nitrate d'argent ( $\text{AgNO}_3$ ) ; les résultats obtenus sont présentés dans l'histogramme ci-dessous.



**Figure V-10:** Variation de la profondeur de pénétration de chlorure en fonction du taux de substitution.

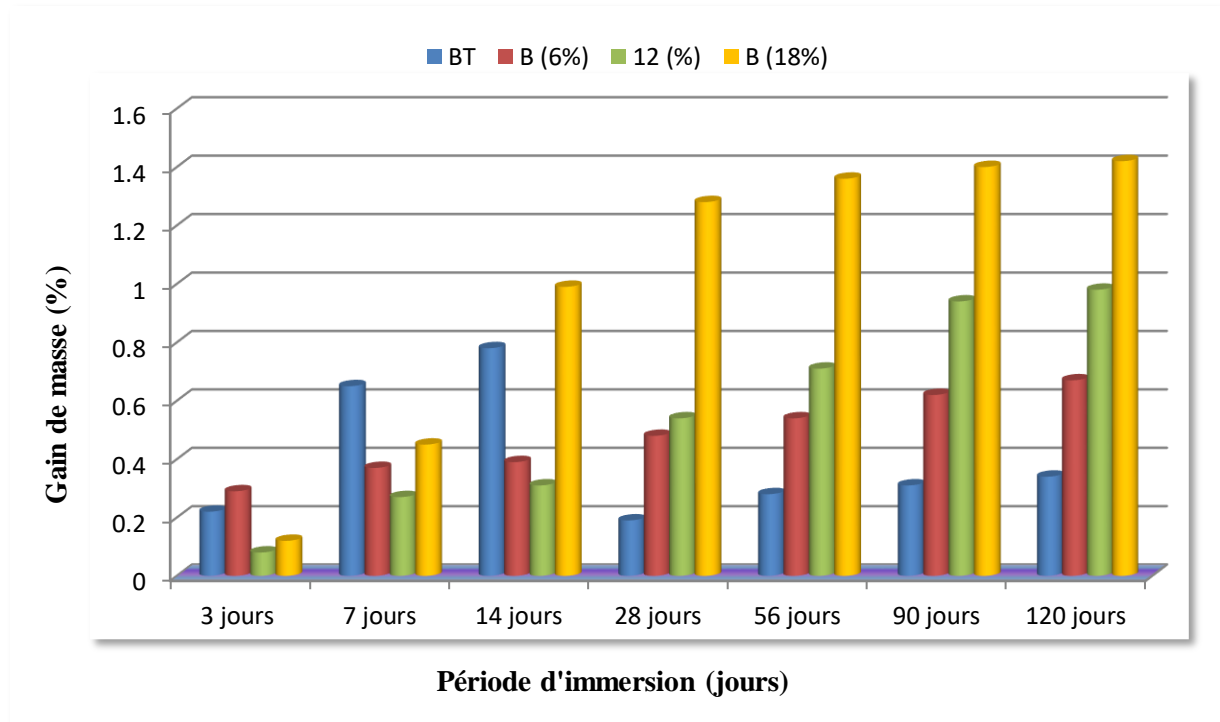
La figure 12 indique un comportement non-linéaire en termes de profondeur de pénétration des ions chlorures, on peut constater que les mélanges de béton avec 6% et 12% de cendre de bois ont résisté le mieux dans la solution saline NaCl concentrée à 5%. Les mêmes résultats sont constatés dans l'étude élaborée par **Cheah Chee Ban et al. (2011)**.

Selon **Khandaker (2006)**, la résistance aux ions chlorure du béton donne une mesure indirecte de sa perméabilité et de la structure des pores internes, car davantage d'ions chlorure traversent un béton le plus il est perméable, ce qui peut être préjudiciable pour les structures.

## V.2.11. Résistance face aux milieux agressifs (les acides et les bases)

### V.2.11.1. Attaque chimique par l'acide chlorhydrique (HCL)

Les résultats relatifs au suivi de la variation du gain de masse en fonction de la durée d'immersion des éprouvettes dans la solution 3.5 % HCL sont présentés sur la figure 11.



**Figure V-11:** Gain de masse en fonction de la période d'immersion dans 3.5% de HCL.

Jusqu'à l'âge de 14 jours (figure 11), on constate une évolution non linéaire de gain de masse en fonction du temps et de période d'immersion.

A partir de 28 jours d'immersion dans la solution 3.5% HCL on peut voir que le coefficient de gain de masse augmente au fur et à mesure avec l'augmentation du taux de cendres de bois dans les mélanges de béton étudié. L'échantillon de béton a base de 18% de cendre de biomasse atteint un pourcentage de 1,42% en termes de gain de masse après 120 jours de conservation dans l'acide chlorhydrique (3.5 % HCL).

Le taux d'attaque dépend de la qualité et la perméabilité du béton, et également la solubilité du sel résultant (Kazi et al. 2017).

Les échantillons de béton entrants en contact avec l'acide chlorhydrique HCL, ce dernier réagit avec l'hydroxyde de calcium  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  pour former le chlorure de calcium  $\text{CaCl}_2$  (Mouli et al. 2010) masse selon la formule suivante (Khandaker et al. 2006) (eq 1 et 2) :

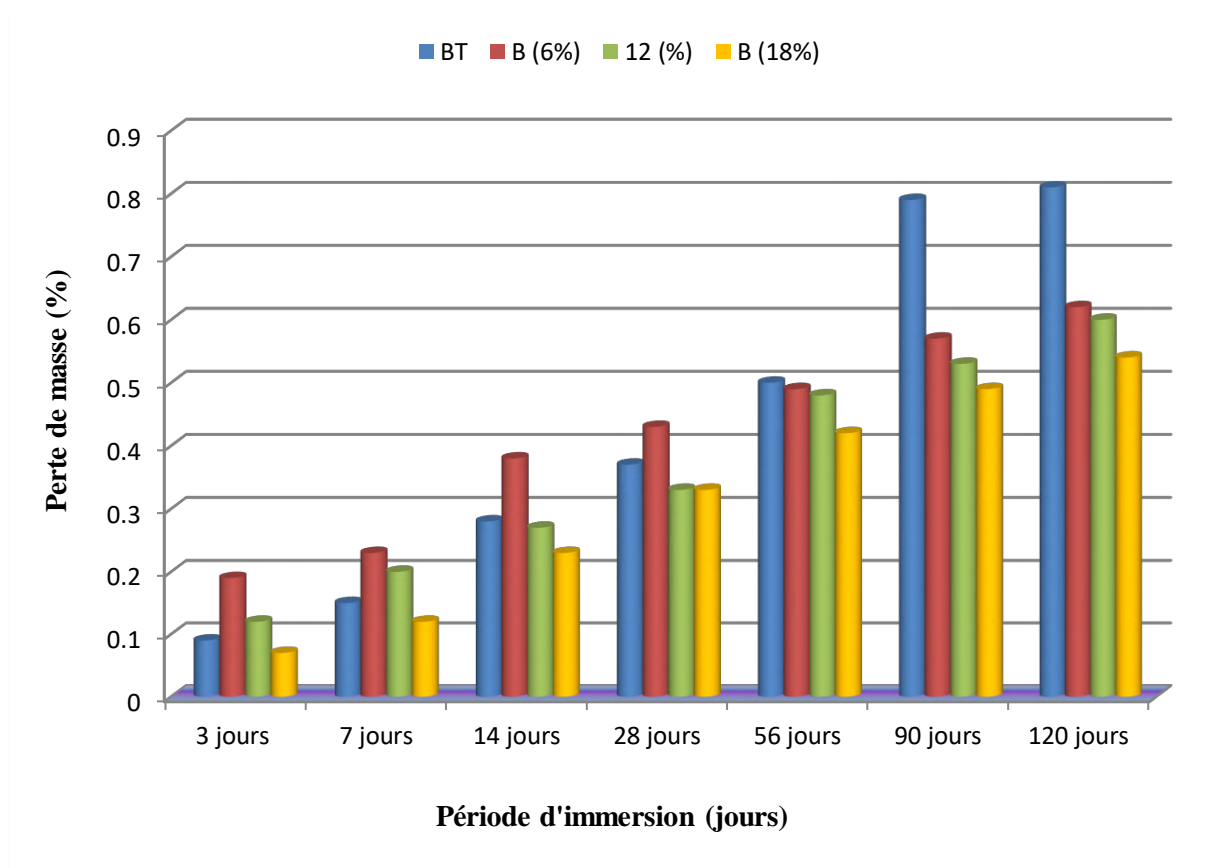


Hydroxyde de calcium + acide chlorhydrique  $\longrightarrow$  chlorure de calcium + eau ....(2)

La surface des éprouvettes attaquées par l'acide chlorhydrique, est recouverte de chlorure de calcium et d'hydroxyde de fer et généralement changent de couleur.

### V.2.11.2. Attaque chimique par l'acide sulfurique ( $H_2SO_4$ )

Les résultats relatifs au suivi de la variation de la perte de masse en fonction de la durée d'immersion des éprouvettes dans la solution 3.5 %  $H_2SO_4$  sont présentés sur la figure 12.



**Figure V-12:** Perte de masse en fonction de la période d'immersion dans 3.5% de  $H_2SO_4$ .

Tous les mélanges de béton sans exception subissent une perte de masse permanente mais modérée (figure 12) dans l'acide sulfurique (3.5 %  $H_2SO_4$ ). A partir de 56 jours de conservation dans la solution chimique, on peut constater que les échantillons de béton à base de cendre de bois montrent une meilleure performance et se dégradent le moins en comparant avec le béton témoin sans ajouts.

Quand le béton rentre en contact avec l'acide sulfurique  $H_2SO_4$ , l'hydroxyde de calcium  $Ca(OH)_2$  (portlandite) réagit avec l'acide sulfurique pour former des sulfates de calcium  $CaSO_4$  (eq 1 et 2) qui se sont déposés comme gypse comme le montre la figure 13. La couche de gypse précipité est facilement écoulee dont le résultat est une perte de masse.



**Figure V-13:** Epreuve de béton après 120 jours de conservation dans 3.5% de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.



Hydroxyde de calcium + acide sulfurique  $\longrightarrow$  sulfate de calcium + eau ... (2)

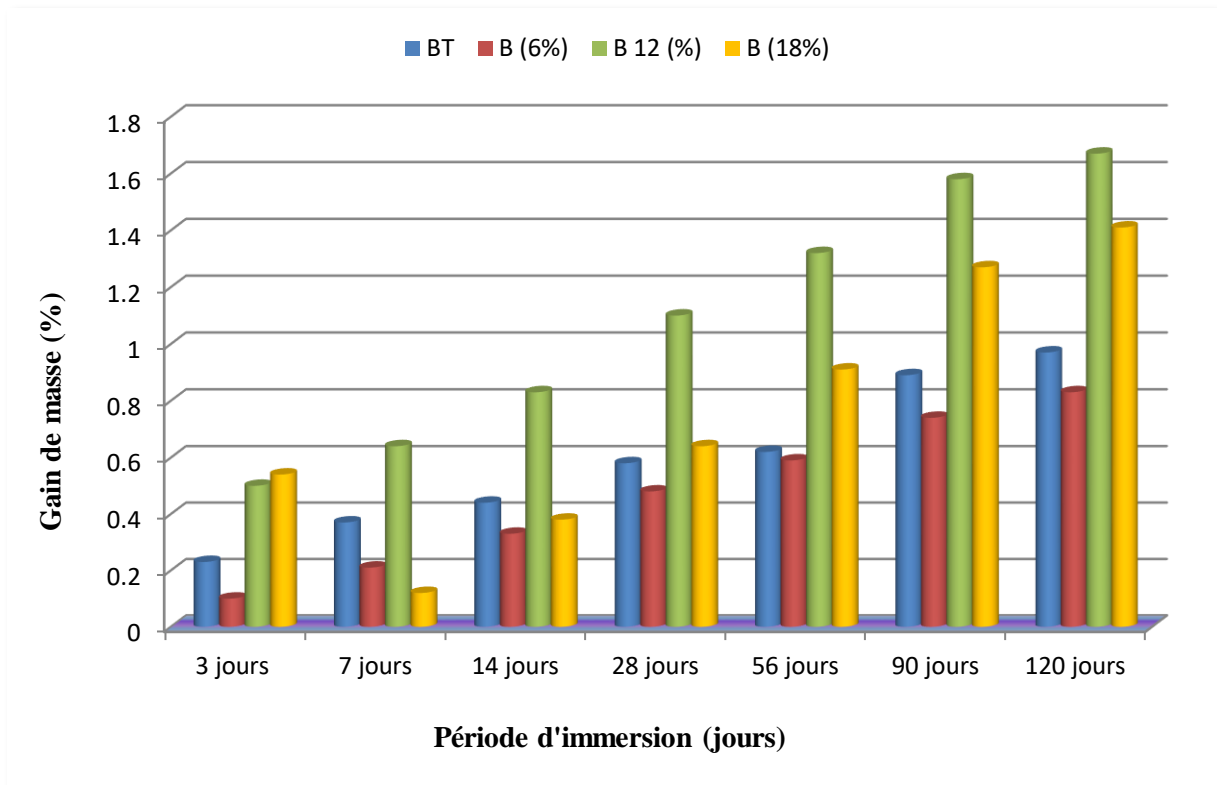
Le gypse déposé est ensuite lessivé, ce qui nous donne une solution blanchâtre (**Mouli et al, 2010**). Après la dégradation chimique, on observe que l'échantillon a eu non seulement une augmentation de porosité mais aussi une diminution de volume et de masse.

### V.2.11.3. Attaque chimique par l'acide acétique (CH<sub>3</sub>COOH)

Les résultats relatifs au suivi de la variation du gain de masse en fonction de la durée d'immersion des éprouvettes dans la solution 3.5 % CH<sub>3</sub>COOH sont présentés sur la figure 14.

Après la conservation des éprouvettes de béton pendant 3 jours dans la solution chimique 3.5% de CH<sub>3</sub>COOH, on remarque un gain de masse pour tous les mélanges étudiés mais avec une évolution dissemblable et non linéaire entre le taux de substitution et le pourcentage de cendre incorporé.

A partir de 28 jours dans l'acide acétique les échantillons B (12%) et B (18%) restent en tête en marquant les pourcentages les plus élevés en termes de gain de masse comme la figure 14.



**Figure V-14:** Gain de masse en fonction de la période d'immersion dans 3.5% de CH<sub>3</sub>COOH.

Les acides organiques tels que l'acide acétique CH<sub>3</sub>COOH sont susceptibles de réagir avec les différents composés hydres et anhydres de la pâte de ciment (hydroxyde de calcium, C-S-H, aluminates hydratés, C<sub>3</sub>S, C<sub>2</sub>S). Par exemple. On peut traduire la réaction de l'acide acétique avec la matrice cimentaire en trois réactions (al-Swaidani et al. 2015) (eq 1, 2 et 3) :

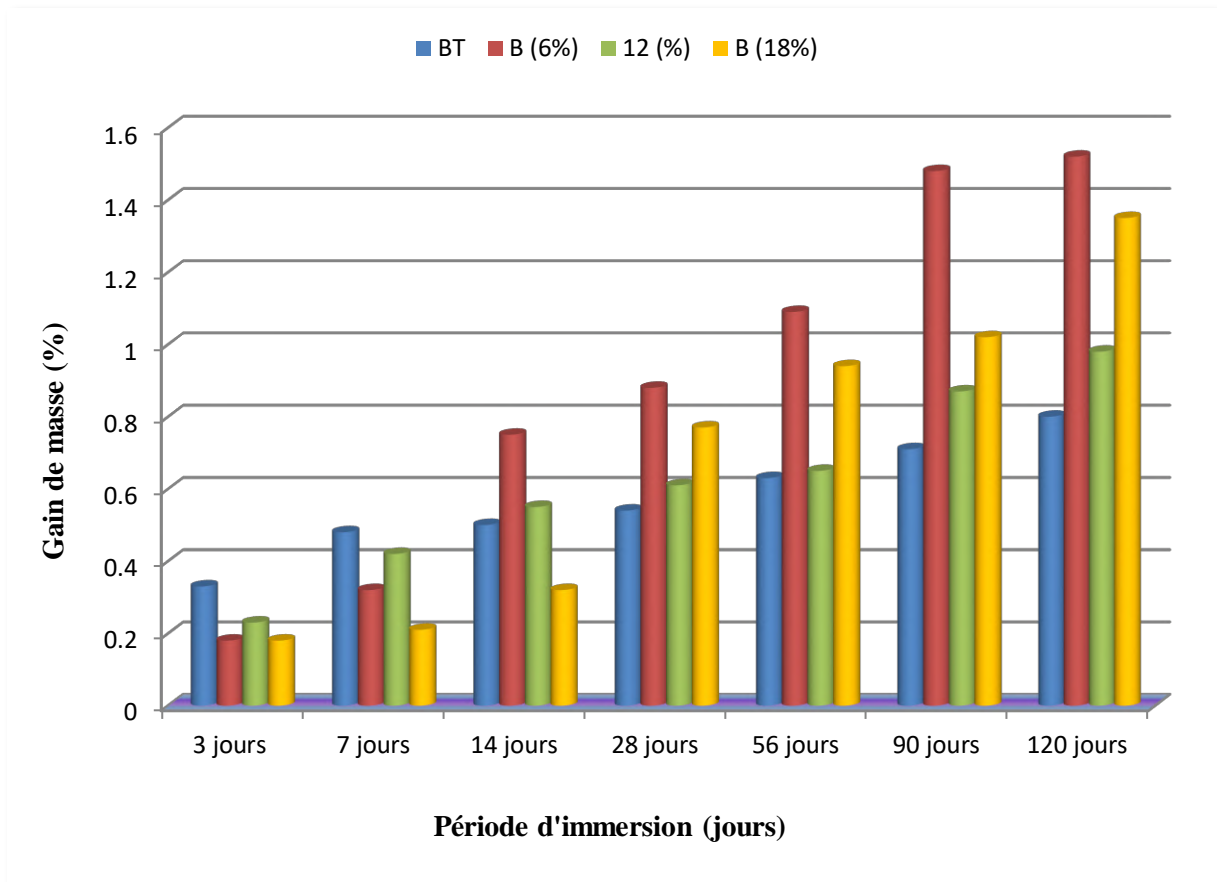


#### V.2.11.4. Attaque chimique par l'hydroxyde de potassium (KOH)

Les résultats relatifs au suivi de la variation du gain de masse en fonction de la durée d'immersion des éprouvettes dans la solution 3.5 % KOH sont présentés sur la figure 15.

Après 3 et 7 jours de conservation des éprouvettes dans la solution KOH concentrée à 3.5%, on observe d'après la figure 15 que le béton témoin sans ajout cendre marque le pourcentage le plus élevé de gain de masse en dépassant les mélanges à base de cendre de biomasse.

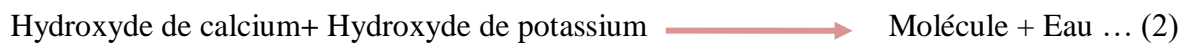
Au-delà de 14 jours dans l'hydroxyde de potassium, le coefficient de gain de masse du béton à base de cendre devient plus significatif. Le mélange B (6%) atteint une valeur approximative de 1,5% de gain de masse.



**Figure V-15:** Gain de masse en fonction de la période d'immersion dans 3.5% de KOH.

L'hydroxyde de potassium est considéré en tant que base forte, cette solution représente un environnement idéal pour évaluer la résistance du béton face à la pollution, la dégradation chimique et la corrosion (**Rehman et al. 2020**).

Les composants du béton principalement l'hydroxyde de calcium réagissent avec l'hydroxyde de potassium (KOH) suivant l'équation qui suit (eq 1 et 2) :



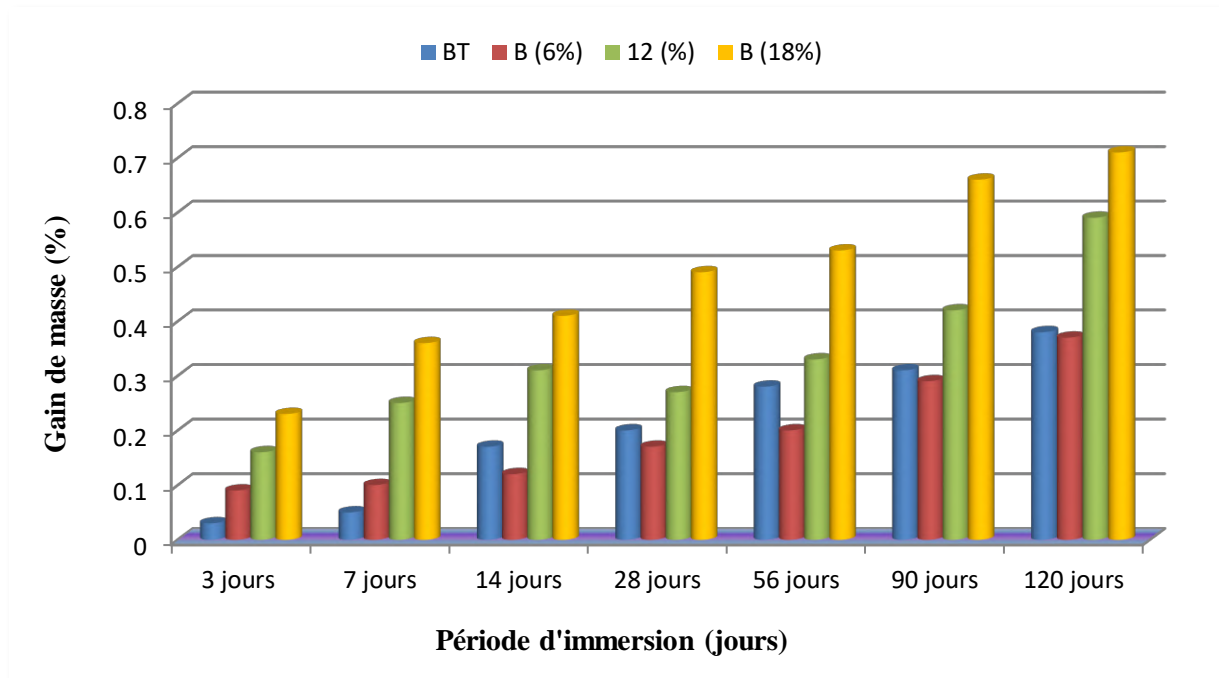
La réaction chimique entre la matrice cimentaire et l'hydroxyde de potassium (KOH) se traduit par une corrosion superficielle d'une couleur foncée comme montre la figure 16, la présence de d'autres composants comme les ions chlorures peuvent accentuer ce phénomène.



**Figure V-16:** Echantillon de béton après 120 jours de conservation dans 3.5% KOH.

#### V.2.11.5. Attaque chimique par les chlorures de sodium (NaCl)

Les résultats relatifs au suivi de la variation du gain de masse en fonction de la durée d'immersion des échantillons dans la solution 3.5 % NaCl sont présentés sur la figure 17.



**Figure V-17:** Gain de masse en fonction de la période d'immersion dans 3.5% de NaCl.

D'après les résultats affichés sur la figure ci-dessus, toutes les formulations de béton étudiées ont subi un gain de masse dissemblable mais reste modéré. Tous les mélanges n'ont pas dépassé un coefficient de 0,71 % de gain de masse mais en revanche les échantillons B (12%) et B (18%) ont gagné plus de poids (gonflement) dans les chlorures de sodium.

Notre solution NaCl été dosée à 3.5%, ce dosage correspond approximativement à la dose de l'eau de mer en sel. La solution du bain est régulièrement renouvelée, afin d'assurer une

teneur en NaCl constante au contact du béton pendant toute la durée de l'essai. Cet essai peut aussi représenter une simulation d'un environnement riche en sulfates (**Brown et al. 2000**). La réaction chimique est traduite par l'équation suivante (eq 1 et 2) :



Hydroxyde de calcium + Chlorures de sodium  $\longrightarrow$  Chlorure de calcium + hydroxyde de sodium... (2)

Le chlorure de calcium ( $\text{CaCl}_2$ ) provoque la dissolution du ciment, la production de sel de  $\text{CaCl}_2$  augmente la porosité ceci engendre par conséquent un gain de masse variable selon plusieurs éléments comme : la composition du béton, la formulation du béton et les additions.

On peut donc conclure que chaque mélange de béton réagit différemment dans les différentes solutions chimiques étudiées comme montre la figure 18.



**Figure V-18:** Echantillons de béton après 120 jours de conservation dans les différentes solutions chimiques étudiées.

### V.3. Conclusion

Après l'analyse des résultats obtenus, on peut conclure que :

- L'ajout des cendres de bois diminue la densité du béton hydraulique, cela peut être bénéfique dans certains cas comme les structures isolantes et les structures légères.
- L'introduction des cendres de biomasse engendre une diminution de l'ouvrabilité.
- L'incorporation des cendres dans le béton hydraulique s'accompagne d'une diminution de résistance à la compression mais les valeurs restent satisfaisantes.

- L'ajout de 12% de cendres de bois améliore la résistance à la traction par flexion à l'âge de 7, 28 et 90 jours.
- Le béton avec 6% de cendres a montré les meilleures performances en termes de résistance à la surface par scléromètre, en résistance à l'aide de l'ultrason ainsi qu'avec la méthode combinée.
- L'absorption d'eau par immersion et par capillarité augmente avec l'augmentation des taux de cendre du béton hydraulique.
- Le béton contenant 6% et 12% de cendres de bois résiste de mieux face aux attaques des ions chlorures.
- Tous les mélanges subissent un gain de masse dans l'acide chlorhydrique (HCL), l'échantillon B (18%) marque la valeur la plus élevée.
- Les éprouvettes de béton à base de cendre de bois se dégradent le moins dans l'acide sulfurique (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>).
- Tous les mélanges subissent un gain de masse dans l'acide acétique (CH<sub>3</sub>COOH), les échantillons B (12%) et B (18%) marquent les valeurs les plus élevées.
- L'incorporation des cendres de biomasse mène à un gain de masse du béton dans l'hydroxyde de potassium (KOH).
- L'incorporation des cendres de biomasse mène à un gain de masse du béton rentrant en contact avec les chlorures de sodium (NaCl).

## **CONCLUSION GENERALE**

## Conclusion générale

Le développement durable et les conceptions plus écologiques sont devenus très présents dans le monde du génie civil récemment, on a vu la naissance de plusieurs tendances comme les bétons verts, les éco-matériaux. Notre travail s'inscrit dans le même contexte.

Les cendres de bois, le thème de notre recherche, sont collectées à la fin de la fabrication du charbon végétal. Le processus de fabrication du charbon génère une quantité considérable de cette matière pulvérulente. On peut aussi trouver les cendres de biomasse dans les champs d'agriculture.

Ces cendres se présentent sous la forme d'une poudre fine de couleur grisâtre similaire à l'aspect visuel du ciment. Aucun traitement préalable n'a été effectué à l'exception d'un léger tamisage pour qu'on puisse s'en débarrasser des parties non-incinérées.

Les principaux axes de cette étude ont porté sur la formulation et la caractérisation des matériaux utilisés, la comparaison des comportements des mélanges de mortier et du béton avec et sans ajout de cendres.

Le programme expérimental a consisté à évaluer le comportement rhéologique, physique et mécanique des mélanges de mortier et du béton à base de cendres de bois. Les taux de substitution ont varié de 0 à 15% pour le mortier et de 0 à 18% pour le béton hydraulique. L'influence de cette substitution sur les caractéristiques du mortier est évaluée après l'exécution d'essais (densité, consistance, air occlus, résistance à la compression et à la traction par flexion, absorption par immersion et par capillarité, pénétration des chlorures, résistance chimique face aux solutions HCL et H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, DRX et la variation dimensionnelle). L'impact de cette substitution est aussi étudié sur les propriétés du béton hydraulique en réalisant une série d'essais suivant des normes en vigueur (densité, ouvrabilité, résistance à la compression et la traction par flexion, résistance obtenue par scléromètre, résistance obtenue par ultrason, méthode combinée, absorption par immersion et par capillarité, pénétration des chlorures, résistance chimique face aux solutions HCL et H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, CH<sub>3</sub>COOH, KOH et NaCl).

L'étude détaillée qu'on a menée suivant des normes bien déterminées nous a permis d'extraire les points suivants :

- **Etude sur mortier**

L'introduction de cendres de bois entraîne une diminution de la densité et de l'ouvrabilité, ce qui peut être bénéfique dans certains.

Le mortier contenant 5 % de cendres de bois présente la meilleure résistance à la compression au jeune âge.

L'ajout de 5% de cendres de bois améliore la résistance à la traction par flexion à l'âge de 2, 7 et 28 jours.

L'incorporation des résidus cendres augmentent l'absorption par immersion et par capillarité du mortier.

Le mortier contenant 5% de cendres de bois est le plus résistant face à la pénétration des chlorures.

Le mélange contenant 10% de cendres de biomasse est le plus résistant face aux attaques de l'acide chlorhydrique (HCL).

Les mélanges contenant 5% et 10% d'ajout de cendres montrent une meilleure performance dans l'acide sulfurique ( $H_2SO_4$ ) et perdent le moins de masse.

La combinaison ciment-cendres influe sur le retrait et sur le gonflement.

- **Etude sur béton**

L'ajout des cendres de bois diminue la densité et l'ouvrabilité du béton hydraulique.

L'incorporation des cendres dans le béton hydraulique s'accompagne d'une diminution de résistance à la compression mais les valeurs restent satisfaisantes.

L'ajout de 12% de cendres de bois améliore la résistance à la traction par flexion à l'âge de 7, 28 et 90 jours.

Le béton avec 6% de cendres a montré les meilleurs performances en terme de résistance à la surface par scléromètre, en résistance à l'aide de l'ultrason ainsi qu'avec la méthode combinée.

L'absorption d'eau par immersion et par capillarité augmente avec l'augmentation des taux de cendre du béton hydraulique.

Le béton contenant 6% et 12% de cendres de bois résiste de mieux face aux attaques des ions chlorures.

Tous les mélanges subissent un gain de masse dans l'acide chlorhydrique (HCL), l'échantillon B (18%) marque la valeur la plus élevée.

Tous les mélanges subissent un gain de masse dans l'acide acétique ( $CH_3COOH$ ), les échantillons B (12%) et B (18%) marquent les valeurs les plus élevées.

L'incorporation des cendres de biomasse mène à un gain de masse du béton dans l'hydroxyde de potassium (KOH).

L'incorporation des cendres de biomasse mène à un gain de masse du béton rentrant en contact avec les chlorures de sodium (NaCl).

D'une manière générale, on peut conclure que la valorisation des cendres de bois dans le mortier et dans le béton hydraulique améliore certaines caractéristiques et a un impact négatif sur d'autres, comme le cas de toute sorte de substitution de ciment par un déchet.

Comme perspectives, on peut citer:

La réalisation d'essais supplémentaires qui n'ont pas été disponibles comme la conductivité thermique ainsi que microstructure.

Evaluer le comportement du mortier et du béton à base de cendres de bois dans d'autres milieux agressifs.

Réaliser des essais sur des mortiers et des bétons contenant des cendres de bois en association avec d'autres déchets.

## **REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

## Références bibliographiques

Akeem Ayinde R and Olumide A. Adenuga, (2013), Wood ash from bread bakery as partial replacement for cement in concrete. *International Journal of Sustainable Construction Engineering & Technology* 4 , pp 75- 81.

Alexandra M et Sokrat S, (2014), Les cendres de bois: un nouvel engrais pour l'agriculture suisse, Institut des sciences en production végétale IPV, 1260 Nyon, Recherche Agronomique Suisse, 5, pp 232–239.

Amir S and Anshul G, (2017), Partial Replacement of Wood Ash with Ordinary Portland Cement and Foundry Sand as Fine Aggregate, *Journal of Civil & Environmental Engineering*, 7 , pp 1-5.

Ana B, Ivana Carević , Jelena Šantek Bajto , Nina Štirmer , Marija Bezinović 1 and Ketii Kristović (2021), Potential of Using Wood Biomass Ash in Low-Strength Composites, *Materials*, 14, pp 1-22.

Aref M. al-Swaidani, Mohammad K. Baddoura , Samira D. Aliyan and Walid Choeb Acid Resistance, (2015), Water Permeability and Chloride Penetrability of Concrete Containing Crushed Basalt as Aggregates, , *Journal of Materials Science and Engineering*, 5, pp 285-304.

ATILH, (2002), hydraulic binder industries union,. Environmental inventory of French cement production, Association technique des liants hydrauliques, pp 24.

Boad (BANQUE OUEST AFRICAINE DE DÉVELOPPEMENT), DIRECTIVES OPERATIONNELLES DE LA BOAD, (2018), industrie du ciment.

COLLECTION TECHNIQUE C IMBÉTON, FICHES TECHNIQUES, Les bétons : formulation, fabrication et mise en œuvre, (2013), TOME 2.

C.Marthong, (2012), Sawdust Ash (SDA) as Partial Replacement of Cement, *International Journal of Engineering Research and Applications*, 2, pp 1980-1985.

Cheah Chee Ban and Mahyuddin Ramli, (2011), Properties of high calcium wood ash and densified silica fume blended cement, *International Journal of the Physical Sciences*, 28, pp 6596-6606.

Chowdhury, S, Mishra, M, and 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, pp 429-437.

Christopher F, Bolatito A and Akintoye O, (2018), A Review of the Properties, Structural Characteristics and Application Potentials of Concrete Containing Wood Waste as Partial Replacement of one of its Constituent Material., *YBL JOURNAL OF BUILT ENVIRONMENT*, 6, pp 63-85.

DVNAC Etude de valorisation des cendres de chaufferies bois Novembre 2001 MARCHE N° 00 01 026 suiveur ADEME : Séverine BOUVOT – MAUDUIT.

Dreux G et FastaJ, (1995), nouveau guide du béton , Paris édition Eyrollèse.

D. BOULDAY – CEDEN F. MARCOVECCHIO – LDAR, (2016), valorisation des cendres issues de la combustion de biomasse, Revue des gisements et des procédés associés, RAPPORT FINAL.

Eric Mathieu, (2006), Fiche détaillée, le ciment.

Futura Science, (2013), (<https://www.futura-sciences.com/sciences/definitions/chimie-ciment-4696/>).

Fatiha Kazi, F, Benslafa, A, Kerdal, D, Darkaoui, F, Latroche, K, Dine, R and Selami, R, (2011), Durability of mortars based on siliceous additions (in french), Communication Science & Technologie 9, pp 9-11.

Frank W, Alexander G, Andrea S, (2022), Ciment de substitution - Recette pour l'éco-béton, (<https://www.seco.admin.ch/seco/fr/home/seco/nsb-news.msg-id-79344.html>).

G Elangovan and V. M. Rajanandhini, (2018), "experimental study and sem analysis on mortar cube with wood ash for partial replaceent of cement", 5, pp 263 – 269.

Habeeb, GA and Fayyadh, MM, (2009), Rice husk ash concrete: the effect of RHA average particle size on mechanical properties and drying shrinkage. Australian Journal of Basic and Applied Sciences 3(3), pp 1616-1622.

Histoire du béton, Info matériaux, Mars 2006.

Khandaker M, Anwar Hossain, (2006), Deterioration and corrosion in scoria based blended cement concrete subjected to mixed sulfate environment. International Journal of Physical Sciences 1, pp 163-174.

Kleib, J (2018), Ecoconception des ciments: synthèse, hydratation et durabilité (Doctoral dissertation, Ecole nationale supérieure Mines-Télécom Lille Douai).

K.D. Hannam C. Deschamps M. Kwiaton L. Venier P.W. Hazlett, Réglementation et directives sur l'utilisation de la cendre de bois comme amendement de sol dans les forêts canadiennes ,Ressources naturelles Canada Service canadien des forêts Rapport d'information GLC-X-17F.

Lucie F, Heather V, Chris Wood and Colin Burns, (2019), The effect of wood ash on the properties and durability of lime mortar for repointing damp historic buildings. Construction and Building Materials 212, pp 500–513.

M. Christian COUTURIER, GESTION ET VALORISATION DES CENDRES DE CHAUFFERIES BOIS Valorisation agricole – Exemple d'une petite chaufferie.

M. Salvo, S. Rizzo, M. Caldirola, G. Novajra , F. Canonico, M. Bianchi and M. Ferraris (2015), Biomass ash as supplementary cementitious material (SCM), Advances in Applied Ceramics, 114, pp 1-10.

M. Thierry BRASSET, DEME, (2005), Gestion et valorisation des cendres de chaufferies bois Agriculture - Petites chaufferies.

M.A. Othuman Mydin,a, M.F. Mohamed Shajahan , S. Ganesan , N. Md. Sani, (2014), Laboratory Investigation on Compressive Strength and Micro-structural Features of Foamed Concrete with Addition of Wood Ash and Silica Fume as a Cement Replacement ,MATEC web of conferences, pp 1-5.

MOHAMADI Saddika, Matériaux et Ouvrages de Génie Civil, (2014), LE BETON ET SES CONSTITUANTS.

Mambou Nguéyep Luc Leroy, Fotseu Miyo Christian Dupont and Kamseu Elie (2019), Valorization of Wood Ashes as Partial Replacement of Portland Cement: Mechanical Performance and Durability. 151, pp 468-478.

Midi de la biomasse, (2015), Pistes de valorisation des cendres de chaufferies biomasse en Wallonie 21 avril.

Mouli, M, Senhadji, Y, Benosman, AS and Khelafi, H (2010), Resistance to acids and the penetration of chloride ions in mortars with pozzolan and fine limestone (in french). Communication Science & technologie 8, pp 57 – 63.

Mylène Lecrenais, 2016, RECHERCHER MYLÈNE Ô NATUREL - JOURNAL D'UNE NATUROPATHE, LA LESSIVE À LA CENDRE ( <http://mylene-o-naturel.blogspot.com>).

O. A. Abdulkareem, J. C. Matthews, and A. M. M. A. Bakri, (2018), Strength and porosity characterizations of blended biomass wood ash-fly ash-based geopolymer mortar, 4th Electronic and Green Materials International Conference, Published by AIP Publishing.

Ottosen, LM, Esben Østergaard Hansen, Jensen, PE, Kirkelund, GM and Golterman, P (2016), Wood ash used as partly sand and/or cement replacement in mortar, 11, 781–791.

P.W. Brown, Steven Badger, The distributions of bound sulfates and chlorides in concrete subjected to mixed NaCl, MgSO<sub>4</sub>, Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> attack.

Pr. GHOMARI Fouad, (2014), Université Aboubekr Belkaid, Département de génie civil, Matériaux de Construction.

Prabagar Subramaniam, Kalya Subasinghe and WR Keerthi Fonseka, (2015), Wood ash as an effective raw material for concrete blocks, IJRET: International Journal of Research in Engineering and Technology, 4, pp 228 – 233.

Pranav S. Dhakulkar and Prof.Sagar D. Malkhede, (2018), Partial replacement of cement by wood-ash, International Journal of Advance Engineering and Research Development, 5, pp 2030-2036.

RIMVYDAS KAMINSKAS and VYTAUTASCESNAUSKAS, (2012), INFLUENCE OF ACTIVATED BIOMASS FLY ASH ON PORTLAND CEMENT HYDRATIO,4, pp 260-268.

S. Sinaj, A. Maltas, H. Kebli1 and MP. Turpault, (2013), LA VALORISATION DES CENDRES EN AGRICULTURE : L'EXPÉRIENCE SUISSE.

Sardar Kashif Ur Rehman , Lahiba Imtiaz , Fahid Aslam , Muhammad Khizar Khan, Muhammad Haseeb , Muhammad Faisal Javed , Rayed Alyousef and Hisham Alabduljabbar

(2020), Experimental Investigation of NaOH and KOH Mixture in SCBA-Based Geopolymer Cement Composite, 2, *Materials*, 13, pp 1-28.

Swaptik Chowdhury, Mihir Mishra and Om Suganya, (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, pp 429–437.

Vaishali G. Ghorpade, (2012), Effect of wood waste ash on the strength characteristics of concrete, 11, pp121-124.

Viet-Anh Vu, Alain Cloutier, Benoit Bissonnette, Pierre Blanchet and Josée Duchesne (2019), The effect of wood ash as a partial cement replacement material for making wood-cement panels, 12, pp 1-11.

Zhifu Yang, Jon Huddleston and Heather Brown, (2016), Effects of Wood Ash on Properties of Concrete and Flowable Fill, *Journal of Materials Science and Chemical Engineering*, 4, pp 101-114.