

UNIVERSITE SAAD DAHLAB BLIDA 1

Faculté De Technologie

Département de Génie Civil



MEMOIRE DE MASTER

Spécialité : Matériaux en génie civil

FORMULATION D'UN MORTIER AUTO-PLACANT A FAIBLE IMPACT ENVIRONNEMENTAL

Par :

HAMROUCHE Abderrahim

GUERDAOUI Ayoub

Devant le jury composé de :

| | | |
|-----------------------|------------------------|--------------|
| Dr. DEBBIH Amina | U. Saad Dahleb Blida 1 | President |
| Dr. BENSACI Hamza | U. Saad Dahleb Blida 1 | Examineur |
| Dr. SI-AHMED Mohammed | U. Saad Dahleb Blida 1 | Promoteur |
| Pr. KENAI Saïd | U. Saad Dahleb Blida 1 | Co-Promoteur |

Blida, Juin 2025

المخلص

تقدم تطوير الأسمنت منخفض الكربون في العالم من خلال الأبحاث الجارية لتحسين الأداء وتقليل انبعاثات ثاني أكسيد الكربون وتكاليف الإنتاج، حيث أن صناعة البناء هي واحدة من أكبر مستخدمي الموارد الطبيعية والطاقة، مما يؤثر بشكل كبير على البيئة .

هذا العمل درس استبدال الأسمنت بالفحم الحيوي المستخرج من خشب الغابات في المونة ذاتية التسوية مع ثلاثة نسب استبدال: 5%، 10% و 15% لتقليل أقصى كمية من ثاني أكسيد الكربون، وأجرى اختبارات في الحالة الطازجة، المتصلبة وعلى المتانة .

نقوم بتصنيع الفحم الحيوي المحلي من نوى الزيتون من خلال عملية البيروليز عند درجة حرارة 700° ومدة 2.5 ساعة. تُظهر النتائج أن الفحم الحيوي القائم على الخشب يزيد من القابلية.

استبدال الأسمنت بنسبة 5% من الفحم الحيوي ارتبط بزيادة في مقاومة الضغط على المدى القصير ويعطي أداءً أفضل على المدى الطويل مقارنةً بـ 0% ، تعطي نسبة 10% نتائج مقبولة مقارنة بالملاط المرجعي و 15% يعطي مقاومة أفضل للانحناء مقارنةً بالملاط المرجعي. إدخال البيوجار يؤدي إلى زيادة كبيرة في امتصاص الماء لمادة الخرسانة المعالجة بالحرارة. المسامية والكثافة الحجمية لجميع الخلطات قابلة للمقارنة .

الكلمات الرئيسية: الفحم الحيوي، القابلية، الملاط، المقاومة، ثاني أكسيد الكربون، المتانة.

RESUME

Le développement de ciment à bas carbone connaît une avancée dans le monde par des recherches en cours pour améliorer les performances et réduire le CO₂ et les coûts de production. L'industrie du bâtiment est l'un des plus grands consommateurs de ressources naturelles et d'énergie, ce qui exerce une influence significative sur l'environnement.

Ce travail a pour objectif le remplacement du ciment par le biochar à base de bois de forêt dans le mortier autoplaçant avec 3 taux de substitutions : 5%, 10% et 15% pour réduire le maximum de CO₂. Des essais sont réalisées à l'état frais, durci et sur la durabilité.

On fabrique un biochar local à base de noyaux d'olives par l'opération de pyrolyse à un degré de 700° et durée de 2h30. Les résultats montrent que le biochar de bois de forêt augmente l'ouvrabilité. Le remplacement du ciment par 5% de biochar a été associé à une augmentation de la résistance à la compression à court terme et donne une meilleure performance à long terme par rapport au 0%, le 10% donne des résultats acceptables en comparaison au mortier de référence et le 15% donne une meilleure résistance à la flexion vis-à-vis au mortier témoin. L'incorporation du biochar provoque une augmentation significative dans l'absorption d'eau du MAP été enregistré. La porosité et la masse volumique de tous les mélanges sont comparables.

Mots clés : biochar, ouvrabilité, mortier, Résistance, CO₂, durabilité.

ABSTRACT

The development of low-carbon cement is advancing worldwide through ongoing research to improve performance and reduce CO₂ and production costs, as the building industry is one of the largest users of natural resources and energy, which has a significant impact on the environment.

This work studied the replacement of cement with forest wood-based biochar in self-compacting mortar with 3 substitution rates : 5%, 10%, and 15% to maximize CO₂ reduction, and conducted tests in fresh, hardened, and durability states.

Local biochar is produced from olive pits through the pyrolysis process at a temperature of 700° for a duration of 2.5 hours. The results show that wood-based biochar increases workability. The replacement of cement with 5% biochar was associated with an increase in short-term compressive strength and provides better long-term performance compared to BC 0, the 10% gives acceptable results compared to the reference mortar and BC 15 offers better flexural strength compared to the control mortar. The incorporation of biochar causes a significant increase in the water absorption of the MAP to be recorded. The porosity and bulk density of all the mixtures are comparable.

Key words: biochar, workability, mortar, resistance, durability.

REMERCIEMENTS

Nous remercions avant toute chose dieu "**ALLAH**" le tout puissant de nous avoir donné la santé, la force et la volonté d'entamer et de terminer ce Mémoire.

Je remercie notre cher promoteur Monsieur le **Dr Mohammed Si-Ahmed** pour sa patience, sa disponibilité, sa rigueur intellectuelle et son souci de perfection ont grandement contribué à la qualité de ce mémoire. Je le remercie pour sa générosité en matière

Nous souhaitons aussi exprimer notre gratitude envers notre co-promoteur, le **Pr Saïd Kenai**, **Dr Walid Yahiaoui**, et le **Pr Menadi** pour nous avoir offert l'opportunité de travailler au sein du laboratoire de recherche géo matériaux de l'université de Blida 1, où nous avons réalisé ce travail.

Nous n'oublions pas de remercier monsieur **Berkka Nabil** qui nous ont aidé lors de la préparation de la matière première.

Nous souhaitons adresser notre reconnaissance aux doctorantes et les techniciens du laboratoire de géo matériaux et génie civil de l'université de Blida 1 **Mme Ahlem** et **Mr Abdelkader** pour leurs assistance et aides.

Pour finir, je remercie les membres du jury qui ont accepté d'évaluer mon mémoire.

Afin de n'oublier personne, mes vifs remerciements s'adressent à tous ceux qui m'ont aidée a la réalisation de ce mémoire.

Dédicaces

Ayoub

Je dédie ce travail à toutes les personnes qui ont cru en moi et m'ont soutenu tout au long de ce parcours.

- À mon père (paix à son âme), pour sa sagesse et ses conseils inestimables, qui m'ont toujours inspiré à donner le meilleur de moi-même.
- À ma mère, pour son amour inconditionnel et son soutien sans faille, qui m'ont donné la force de persévérer même dans les moments les plus difficiles.
- À mes sœurs, pour leur encouragement constant et leur confiance en moi, qui ont été une source inépuisable de motivation et de réconfort.
- À ma chère Racha, pour son amour, sa présence, ses aides inestimables et sa bienveillance.
- À mes amis, pour leur présence indéfectible et leur aide précieuse, qui ont rendu ce parcours beaucoup plus agréable et enrichissant.

Abderrahim

Je dédie ce travail à toutes les personnes qui ont cru en moi et m'ont soutenu tout au long de ce parcours.

- À mes chers parents, pour leur amour constant, leurs encouragements et les sacrifices inlassables et leur précieuse assistance tout au long de mes études.
- À mon frère et ma sœur, pour tous les bons moments passé ensemble.
- À mes amis, pour leur soutien et leurs encouragements sincères tout au long de mon parcours.

SOMMAIRE

| | |
|--|----|
| Résumé | |
| Remerciements | |
| Dédicaces | |
| Liste des tableaux | |
| Liste des figures | |
| Liste d'abréviations et notations | |
| Introduction générale :..... | 17 |
| CHAPITE I | 15 |
| I.1. Introduction :..... | 20 |
| I.2. Les Ciments : | 20 |
| I.2.1. Fabrication du ciment : | 20 |
| I.2.2. Effet de la fabrication du ciment sur l'environnement : | 24 |
| I.3. Propriétés des ciments avec ajouts :..... | 25 |
| I.3.1 Ciment à base de laitier :..... | 25 |
| I.3.2 Ciment à base de pouzzolane (locale) : | 26 |
| I.3.3 Ciment à base de fumée de silice : | 26 |
| I.3.4 Ciment à base de métakaolin : | 27 |
| I.3.5 Ciment à base de filler de calcaire : | 27 |
| I.3.6 Ciment à base de cendre de boues :..... | 28 |
| I.3.7 Ciment à base de cendre volante :..... | 29 |
| I.3.8 Ciment à base de poudre de verre : | 30 |
| I.4. Effet de ciment avec ajout sur mortier autoplaçant :..... | 33 |
| I.4.1. Effet de ciment à base de filler de calcaire sur mortier autoplaçant : | 33 |
| I.4.2. Effet de ciment à base de laitier de haut fourneau sur mortier autoplaçant :..... | 34 |
| I.4.3. Effet de ciment à base de pouzzolane sur mortier autoplaçant : | 34 |
| I.4.4. Effet de ciment à base de fumée de silice sur mortier autoplaçant : | 34 |
| I.4.5. Effet de ciment à base de métakaolin sur mortier autoplaçant : | 35 |
| I.4.6. Effet de ciment à base de mâchefer de charbon minérale sur mortier :..... | 36 |
| I.5. Le biochar : | 36 |
| I.5.1. Histoire sur l'utilisation du charbon : | 36 |
| I.5.2. Définition de biochar : | 36 |
| I.5.3. Adsorption : | 37 |
| I.5.3.1 Définition : | 37 |

| | |
|--|----|
| I.5.3.2 Classification de phénomène d'adsorption : | 38 |
| I.5.4. Fabrication de biochar : | 39 |
| I.5.4.1 Procédés de conversion thermochimique de la biomasse : | 39 |
| I.5.5. Propriétés physicochimiques d'un biochar : | 41 |
| I.5.5.1 Propriétés physique : | 41 |
| I.5.5.1.1 Surface spécifique : | 41 |
| I.5.5.1.2 Porosité : | 42 |
| I.5.5.1.3 Densité : | 42 |
| I.5.5.2 Propriétés chimique : | 42 |
| I.5.5.2.1 PH : | 42 |
| I.5.5.2.2 Capacité d'échange cationique : | 42 |
| I.5.5.2.3 Composition minérale : | 43 |
| I.5.5.2.4 conductivité électrique : | 43 |
| I.5.6 Fabrication de biochar au laboratoire : | 43 |
| I.5.6.1 Préparation de matière première : | 43 |
| I.5.6.2 La pyrolyse : | 45 |
| I.5.7 Type de biochar : | 47 |
| I.5.8 Application de biochar : | 48 |
| I.5.9 Effet du biochar sur le comportement des mortiers et du béton : | 49 |
| CHAPITE II | 1 |
| II.1. Introduction : | 56 |
| II.2. Caractéristiques des matériaux : | 56 |
| II.2.1. Ciment : | 56 |
| II.2.2. Sable | 57 |
| II.2.3. Biochar : | 62 |
| II.2.4. Préparation de biochar : | 63 |
| II.2.4. L'eau de gâchage | 64 |
| II.2.5. Super-plastifiant | 64 |
| II.3. Les essais réalisés : | 66 |
| II.3.1. Consistance et prise : | 66 |
| II.3.2. Formulation de MAP : | 67 |
| II.3.3. Essais sur MAP à l'état frais : | 69 |
| II.3.3.1 Essais D'étalement au mini cône : | 69 |
| II.3.3.2 Essais de V-Funnel : | 70 |
| II.3.3.3 Moulage et conservation des éprouvettes : | 71 |

| | |
|--|-----|
| II.3.4. Essais sur MAP à l'état durci : | 72 |
| II.3.4.1. Résistance à la flexion : | 72 |
| II.3.4.2. Résistance à la compression : | 73 |
| II.3.5. Essais sur les indicateurs de durabilité : | 74 |
| II.4. Organigrammes des essais | 78 |
| II.5. Conclusion :..... | 79 |
| CHAPITRE III..... | 80 |
| III.1. Introduction : | 81 |
| III.2. Optimisation du dosage en superplastifiant : | 81 |
| III.3. Influence de biochar à l'état frais : | 83 |
| III.4. Influence de biochar à l'état durci : | 85 |
| III.4.1 La masse volumique : | 85 |
| III.4.2. Résistance à la compression : | 86 |
| III.4.3. Résistance à la flexion : | 87 |
| III.5. Influence de biochar sur les indices de durabilité : | 88 |
| III.5.1 Porosité accessible à l'eau : | 88 |
| III.5.2. Absorption capillaire : | 90 |
| III.6. Conclusion :..... | 95 |
| CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES..... | 81 |
| Conclusion générale :..... | 97 |
| Perspectives :..... | 97 |
| RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES..... | 98 |
| ANNEXES..... | 100 |

LISTE DES TABLEAUX

| | |
|--|----|
| Tableau I.1 : Composition chimique élémentaire de la pouzzolane naturelle de Beni-Saf [19] | 26 |
| Tableau I.2 : Composition chimique de fumée de silice CONDENSIL S95 DS [21] | 27 |
| Tableau I.3 : Composition chimique des C.V obtenue à partir de différents types de charbon [25] | 30 |
| Tableau I.4 : Compositions chimiques poudre de verre. [26] | 33 |
| Tableau I.5 : Condition opératoires selon les différents types de pyrolyse [58] | 41 |
| Tableau I.6 : Composition élémentaire de biochar..... | 46 |
| Tableau II.1 : Caractéristiques physiques du ciment..... | 57 |
| Tableau II.2 : Composition chimique de ciment (%)..... | 57 |
| Tableau II.3 : Caractéristiques physiques de sable d'Oued Souf..... | 58 |
| Tableau II.4 : Résultats d'analyse granulométrique d'Oued Souf..... | 58 |
| Tableau II.5 : Caractéristique physiques de sable de Baghlia..... | 59 |
| Tableau II.6 : Résultats d'analyse granulométrique du Baghlia..... | 60 |
| Tableau II.7 : Résultats d'analyse granulométrique du mélange..... | 61 |
| Tableau II.8 : Caractéristiques physiques de sable corrigé..... | 62 |
| Tableau II.9 : Caractéristiques physiques de biochar..... | 64 |
| Tableau II.10 : Les caractéristiques de Super-plastifiant MEDAFLOW 30..... | 65 |
| Tableau II.11 : Séquence de malaxage du MAP..... | 68 |
| Tableau III.1 : Valeurs d'étalement et v-Funnel en fonction du dosage en SP..... | 81 |
| Tableau III.2 : Composition des différents MAP par un Volume de 1,2 litres..... | 83 |
| Tableau III.3 : Valeur de l'étalement et le Temps d'écoulement des différents MAP... | 83 |

| | |
|---|----|
| Tableau III.4 : Regroupement des résultats de masse volumique à 28 jours de cure humide..... | 85 |
| Tableau III.5 : Résistance à la compression des MAP..... | 86 |
| Tableau III.6 : Résistance à la flexion des MAP..... | 87 |
| Tableau III.7 : Regroupement des résultats de porosité accessible à l'eau à 28 jours de cure humide..... | 89 |
| Tableau III.8 : Les valeurs moyennes d'absorption d'eau des différents mortiers après 28 jours de cure humide..... | 90 |
| Tableau III.9 : Sorptivité des MAP après 28 jours de cure humide..... | 93 |

LISTE DES FIGURES

| | |
|--|----|
| Figure I.1 : Concassage primaire de la matière première [8]..... | 21 |
| Figure I.2 : Hall de pré-homogénéisation du cru [9]..... | 22 |
| Figure I.3 : Broyeur à boulets de cimenterie [9]..... | 23 |
| Figure I.4 : Procédé de fabrication de ciment. [10] | 24 |
| Figure I.5 : Photo de kaolin (a) et de Métakaolin (b) [23]..... | 27 |
| Figure I.6 : filler calcaire..... | 28 |
| Figure I.7 : cendre de boues..... | 29 |
| Figure I.8 : poudre de verre..... | 31 |
| Figure I.9 : Analyse granulométrique par laser de la poudre de verre. [26] | 32 |
| Figure I.10 : Résistances relatives (%) des mortiers en fonction des finesses du verre. [29] | 32 |
| Figure I.11 : Effet des fines de verre (C5, C6, C7, C8) sur la réduction des gonflements de mortiers (M0, M1). [30]..... | 33 |
| Figure I.12 : Type de fabrication de biochar [41] | 37 |
| Figure I.13 : Schéma de l'adsorption physique..... | 38 |
| Figure I.14 : les noyaux d'olives après séchage..... | 44 |
| Figure I.15 : l'échantillon après le broyage..... | 44 |
| Figure I.16 : un four tubulaire (Nabertherm)..... | 45 |
| Figure I.17 : l'échantillon après la pyrolyse..... | 46 |
| Figure I.18 : Caractérisation Morphologique par MEB..... | 47 |
| Figure I.19 : Analyse EDX..... | 47 |
| Figure I.20 : Affaissement du mortier BFUP frais en fonction de la quantité de biochar. [78]..... | 51 |

| | |
|--|----|
| Figure I.22 : Résistance à la compression du mortier BFUP en fonction du dosage de biochar à 3 et 28 jours de durcissement. [78]..... | 52 |
| Figure I.23 : Retrait de l'UHPC mortier lors du séchage avec différents dosages (a) et types (b) de biochar. [78]..... | 54 |
| Figure I.24 : Retrait endogène du mortier BFUP à différents taux (a) et types de biochar (b). [79]..... | 54 |
| Figure II.1 : Ciment CEM I 52,5N..... | 56 |
| Figure II.2 : sable d'Oued Souf..... | 58 |
| Figure II.3 : Sable de Baghlia..... | 59 |
| Figure II.4 : Sable corrigé..... | 61 |
| Figure II.5 : Courbe granulométrique..... | 62 |
| Figure II.6 : Biochar..... | 63 |
| Figure II.7 : micro-broyeur..... | 64 |
| Figure II.8 : Super-plastifiant..... | 65 |
| Figure II.9 : Vicat..... | 67 |
| Figure II.10 : Malaxeur a mortier..... | 68 |
| Figure II.11 : Etalement au mini cône..... | 69 |
| Figure II.12 : Les démentions du mini cône..... | 70 |
| Figure II.13 : L'essai de V-Funnel..... | 70 |
| Figure II.14 : Moule prismatique pour mortier..... | 71 |
| Figure II.15 : Conservation des éprouvettes..... | 72 |
| Figure II.16 : Essai de résistance à la traction par flexion..... | 73 |
| Figure II.17 : Essai de résistance à la compression..... | 74 |
| Figure II.18 : Application de la résine sur la face inférieure de l'éprouvette..... | 75 |
| Figure II.19 : Absorption capillaire..... | 76 |

| | |
|--|----|
| Figure II.20 : L'essai de porosité accessible à l'eau..... | 77 |
| Figure II.20 : Procédé de formulation d'un MAP..... | 78 |
| Figure II.21 : Organigramme des essais réalisés..... | 79 |
| Figure III.1 : Etalement du MAP en fonction du dosage en SP..... | 82 |
| Figure III.2 : Le Temps écoulement du MAP en fonction du dosage en SP..... | 82 |
| Figure III.3 : Etalement en fonction du taux de substitution de biochar..... | 84 |
| Figure III.4 : Temps d'écoulement en fonction du taux de substitution de biochar..... | 84 |
| Figure III.5 : Evolution de la masse volumique des différents mortiers après 28 jours de cure humide..... | 85 |
| Figure III.6 : Evolution de la résistance à la compression à 7, 28 et 45 jours..... | 86 |
| Figure III.7 : Evolution de la résistance à la flexion à 7, 28 et 45 jours..... | 88 |
| Figure III.8 : Evolution de la porosité accessible à l'eau des différents MAP après 28 jours de cure humide..... | 89 |
| Figure III.9 : Absorption d'eau par capillarité des mortiers après 28 jours de cure humide..... | 91 |
| Figure III.10 : Sorptivité du BC 0 après 28 jours de cure humide..... | 91 |
| Figure III.11 : Sorptivité du BC 5 après 28 jours de cure humide..... | 92 |
| Figure III.12 : Sorptivité du BC 10 après 28 jours de cure humide..... | 92 |
| Figure III.13 : Sorptivité du BC 15 après 28 jours de cure humide..... | 93 |
| Figure III.14 : Sorptivité $0 \leq t \leq 6h$ et $t > 6h$ des différents MAP à base de biochar d'après 28 jours de cure humide..... | 94 |

LISTE D'ABREVIATIONS ET NOTATIONS

- GES : gaz à effet de serre
- CPO : ciment portland ordinaire
- Al_2O_3 : Alumine
- CaO : L'oxyde de calcium
- CO_2 : dioxyde de Carbone
- Fe_2O_3 : Oxyde de fer
- SiO_2 : la silice
- MgO : Oxyde de magnésium
- SiO_2 : Dioxyde de silicium
- SO_3 : Trioxyde de soufre
- K_2O : Oxyde de potassium
- TiO_2 : le dioxyde de titane
- Na_2CO_3 : Carbonate de Sodium
- Ph : le potentiel hydrogène
- BC : biochar
- C abs : Coefficient d'absorption
- ESP : Equivalent de sable Piston
- ESV : Equivalent de sable visuel
- MF : Module de finesse
- D : Diamètre d'étalement
- S : Sorptivité
- S/M : Rapport sable sur Mortier
- SP : Superplastifiant
- MAP : mortier autoplaçant
- E/L : Rapport eau sur liant
- E/C : Rapport eau sur ciment
- Rc28 : Résistance à la compression à 28 jours
- I : l'absorption par capillarité
- ρ abs : Masse volumique absolue

- ρ_{app} : Masse volumique apparente
- ξ : porosité ouverte.

INTRODUCTION GENERAL

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale :

De nos jours, le béton est largement utilisé à travers le monde dans le domaine de la construction car il est bon marché et facile d'utilisation. Cependant, le béton a un fort impact environnemental dû à la production de ciment Portland qui est responsable d'importantes émissions de dioxyde de carbone. Pour cette raison, de nouvelles technologies de béton ont été développées permettant de réduire fortement leur empreinte carbone tout en conservant des propriétés mécaniques comparables à celles du ciment Portland.

Le ciment bas carbone se compose de ciment industriel additionné de composés minéraux, comme l'argile calcinée, le biochar, les cendres volantes ou les laitiers de hauts fourneaux.

En raison de son coût abordable et de la simplicité d'approvisionnement en composants essentiels, le ciment Portland ordinaire (CPO) est couramment employé dans les projets d'urbanisation. Cependant, la fabrication de ciment Portland standard nécessite une importante consommation de ressources naturelles et d'énergie. D'après les données en notre possession, on a constaté que la production de chaque tonne métrique de ciment nécessite environ 1,5 tonne métrique de matières premières et 1 m³ de ciment provoque 80% d'émission de CO₂ [1].

De plus, la production d'une tonne de CPO émet une quantité correspondante de CO₂ dans l'atmosphère, contribuant à environ 7 % des émissions mondiales de gaz à effet de serre (GES) d'origine humaine [1,2]. Face à la croissance de la demande en matériaux, il est probable que ce problème se détériore dans le futur. L'incorporation de carbone stable directement dans le matériau, sans affecter les performances de la matrice hôte, représente une méthode efficace pour diminuer les émissions nettes liées aux matériaux cimentés [3].

On a identifié le biochar (BC) comme un matériau qui capture le carbone et optimise les performances des composites de ciment, ce qui pourrait à terme diminuer les émissions et accroître la capacité opérationnelle des infrastructures. Le biochar possède une grande surface et une affinité pour les molécules non polaires, ce qui lui confère un potentiel en tant qu'adsorbant de CO₂. L'inclusion du BC dans les composites cimentaires a prouvé qu'elle peut contribuer à une réduction de 1,8 Gt d'équivalent CO₂ par an, ce qui représente 12% des émissions d'origine humaine [4]. Le BC propose une solution visant à optimiser le recyclage des déchets et à réduire la nécessité d'espace pour le traitement des résidus. L'objectif est de convertir les résidus agricoles, les restes alimentaires et les débris de bois

INTRODUCTION GENERALE

en BC, qui pourra être employé dans la fabrication de matériaux de construction. Ce mécanisme pourrait significativement diminuer les émissions de gaz à effet de serre, avec une estimation d'environ 870 kg équivalent CO₂ (CO₂-e) par tonne de matière première non humide. Près de 62 à 66 % de cette diminution des émissions est réalisée par l'intermédiaire des moyens de captage et d'entreposage du carbone employés lors de la fabrication du BC [5].

Le biochar, fabriqué à partir de diverses sources de biomasse, possède des caractéristiques qui peuvent varier et être ajustées en fonction de différentes applications. Le biochar peut avoir un impact majeur dans le domaine de l'agriculture durable, la réduction du carbone et les initiatives de diminution des déchets, grâce à sa capacité d'adaptation à la gestion des résidus organiques, à la capture du carbone et à l'amélioration des sols. De plus, le BC participe à l'amélioration du recyclage de divers types de déchets de biomasse actuellement utilisés pour le compostage, comme source d'énergie pour les centrales de cogénération ou destinés aux décharges.

Cette recherche vise à évaluer l'impact du biochar valorisé (bois) dans le MAP de ciment sur ses propriétés mécaniques et physiques, sa durabilité, aussi sur son comportement rhéologique et la préparation du biochar à base des noyaux d'olive. Le mémoire se compose de trois sections. Le premier chapitre offre une revue bibliographique des divers types de ciment et biochar, en plus d'aborder différentes facettes du comportement des MAP contenant du biochar. Le chapitre deux expose le programme expérimental et la caractérisation des matériaux employés pour élaborer un MAP contenant du biochar. Le chapitre trois se focalise sur l'analyse globale et la discussion des résultats obtenus. Pour finir, une synthèse globale et des suggestions sont fournies pour les recherches à venir.

CHAPITE I
REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

I.1. Introduction :

Dans ce chapitre, nous allons nous focaliser sur la revue de littérature. Nous fournissons un aperçu du ciment, des ajouts, du biochar et de leurs constituants, ainsi que de leurs propriétés. Nous aborderons également le processus de production du biochar et ses différentes variantes, avant d'examiner l'influence du biochar sur le comportement des matériaux cimentaires.

I.2. Les Ciments :

Le ciment est une substance hydrophile. Il s'agit un finement anhydride broyé qui, simplement mélangé à de l'eau, forme des hydrates dont l'imbibition rigidifie le matériau granulaire initialement non cohésif en un matériau cohésif à hautes propriétés mécaniques. Qui, lorsqu'il est simplement mélangé à de l'eau, forme des hydrates dont l'imbibition rigidifie le matériau granulaire initialement non cohésif en un matériau cohésif avec des propriétés mécaniques élevées [6].

I.2.1. Fabrication du ciment :

Le principal constituant du ciment est le clinker, il est obtenu à partir de cuissons de 80% calcaire et 20% d'argile à une température de 1450°.

Les étapes de fabrication de ciment sont :

➤ Extraction :

Les cimenteries disposent habituellement d'une ou plusieurs carrières, qui fournissent les matières premières nécessaires. On utilise principalement le calcaire et l'argile pour la production de ciment. Le calcaire peut être composé de carbonate de calcium (CaCO_3), de dolomite ($\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$ ou $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), ou encore de dioxyde de calcium et de magnésium ($\text{CaO} \cdot \text{MgO}$). En ce qui concerne l'argile, elle peut se présenter de la manière suivante : • Kaolinite : $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot (\text{OH})_4$; • Halloysite : $\text{Al}_2(\text{Si}_2\text{O}_5) \cdot (\text{OH})_4$; • Montmorillonite : $(\text{Na}, \text{Ca})_{0,3} (\text{Al}, \text{Mg})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$; • Illite ou Phyllosilicates : $\text{K}_{0,65} \text{Al}_2(\text{Al}_{0,65}\text{Si}_{3,35}\text{O}_{10})\text{OH}$; • Chlorite : $\text{Mg}_5 (\text{Al}, \text{Fe})(\text{OH})_8(\text{Al}, \text{Si})_4\text{O}_{10}$; • Sépiolite : $\text{Mg}_4\text{Si}_6\text{O}_{15}(\text{OH})_{22} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$;

Ces deux ressources peuvent être extraites soit dans la même carrière, soit dans des carrières distinctes. Les calcaires sont obtenus à partir des parois rocheuses à l'aide d'explosifs et/ou de pelles mécaniques. Le transfert vers les zones de concassage se fait à l'aide de courroies transporteuses ou de bennes de diverses capacités. Suite au concassage, les calcaires sont entreposés dans l'entrepôt de stockage des matières premières (calcaire), qui peuvent contenir plusieurs milliers de tonnes. En règle générale, l'argile est extraite par le biais de l'excavation directe, c'est-à-dire à la surface. Le processus de pré-homogénéisation de l'argile s'effectue au même emplacement d'extraction. Cette procédure définit le type de clinker désiré [7].

➤ **Concassage :**

Cette procédure concerne la production de gravillons de dimensions plus réduites (50 mm au maximum). Les blocs extraits sont généralement concassés sur le site même de leur extraction. Suite à ce premier concassage, les matières premières sont acheminées vers l'usine où elles sont entreposées et mises en préparation.

Il est nécessaire d'échantillonner, de doser et de mélanger les premières matières pour garantir une composition constante dans le temps. L'échantillonnage continu permet d'établir le volume des divers ajouts requis (oxyde de fer, alumine et silice) [8].

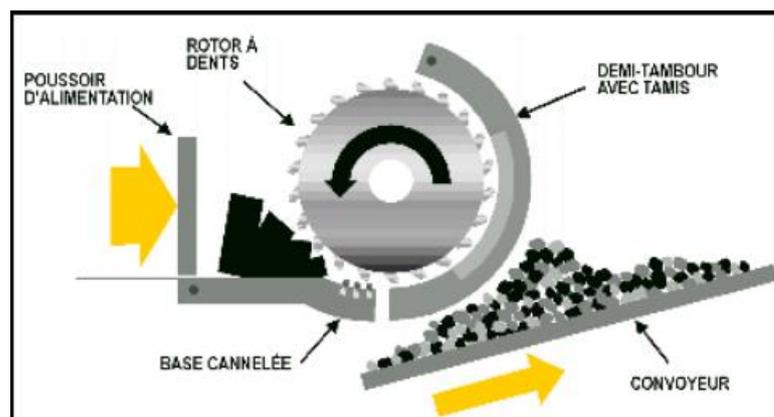


Figure I.1 : Concassage primaire de la matière première [8].

➤ **Préparation de la matière première :**

On désigne le mélange de calcaire et d'argile, qui constitue la base du ciment, sous les termes « cru » ou « farine ».

La préparation du cru, qui consiste à mélanger simultanément du calcaire et de l'argile selon des proportions spécifiques basées sur leurs compositions chimiques distinctes, tout en maintenant généralement un ratio d'environ 80% de calcaire pour 20% d'argile, peut s'effectuer via diverses méthodes : à sec, à humide, semi-sec ou semi-humide.

La méthode de préparation à sec du cru est la plus utilisée dans certains pays. Elle inclut les étapes suivantes :

Pré-homogénéisation : cette étape vise à effectuer un mélange initial. Elle consiste à superposer les éléments constitutifs du cru en strates hachées, créant ainsi les « tâches de pré-homogénéisation ».

Séchage-broyage : après avoir été recueilli avec une roue-pelle, le mélange réalisé est dirigé vers la station de broyage pour être séché et réduit en une poudre dont les grains ne dépassent pas 160 microns.

Séparation : cette étape implique de retourner au broyeur les particules qui ne sont pas assez broyées et de capter les particules fines présentes dans les gaz.

Homogénéisation : au cours de cette étape, grâce à un mélange pneumatique ou mécanique énergétique, on peut obtenir un produit parfaitement homogène avec des propriétés chimiques uniformes, capable d'être cuit et de produire un ciment de qualité [9].



Figure I.2 : Hall de pré-homogénéisation du cru [9].

➤ **La cuisson :**

La farine est obtenue à partir de silos d'homogénéisation, grâce à des soufflées à air. Elle est ensuite acheminée par des vis sans fin, puis par des élévateurs à godets vers les doseurs, qui contrôlent le flux de farine destiné au four. Les doseurs acheminent la farine par un système de transport pneumatique vers la tour de préchauffage, où débutent les premières transformations de la farine. La farine peut être introduite dans le tour de préchauffage à une température variant de 60 à 80 °C. Avant d'être dirigé vers l'entrée du four rotatif, la température est portée à 900 °C dans les échangeurs cyclone. Plusieurs réactions physico-chimiques se produisent à l'intérieur du four, y compris la décomposition de la structure cristalline de l'argile, la libération du dioxyde de carbone et le processus de clinkerisation.

Lorsque le clinker sort du four, il est encore à une température extrêmement élevée (1200 °C), ce qui rend essentiel le refroidissement. Le clinker est acheminé vers le dispositif de refroidissement, où il est éliminé à une température maximale de 200 °C [7].

➤ **Broyage :**

La dernière étape de la fabrication du ciment consiste à broyer du clinker en forme de poudre fine dans un broyeur, puis à en ajouter le gypse.

Pour obtenir un ciment en mélange de 95 % de clinker et 5 % de gypse.



Figure I.3 : Broyeur à boulets de cimenterie [9].

➤ **Stockage :**

Après la sortie du broyeur, on transporte le ciment vers des silos de stockage, puis on le décharge en sacs de 25 kg et 50 kg.

Le processus de mise en sachets se fait à l'aide de machines qui peuvent remplir entre 2000 et 4000 sacs en papier kraft par heure [9].

Le schéma (**Figure I.4**) représente les procédés de fabrication de ciment :

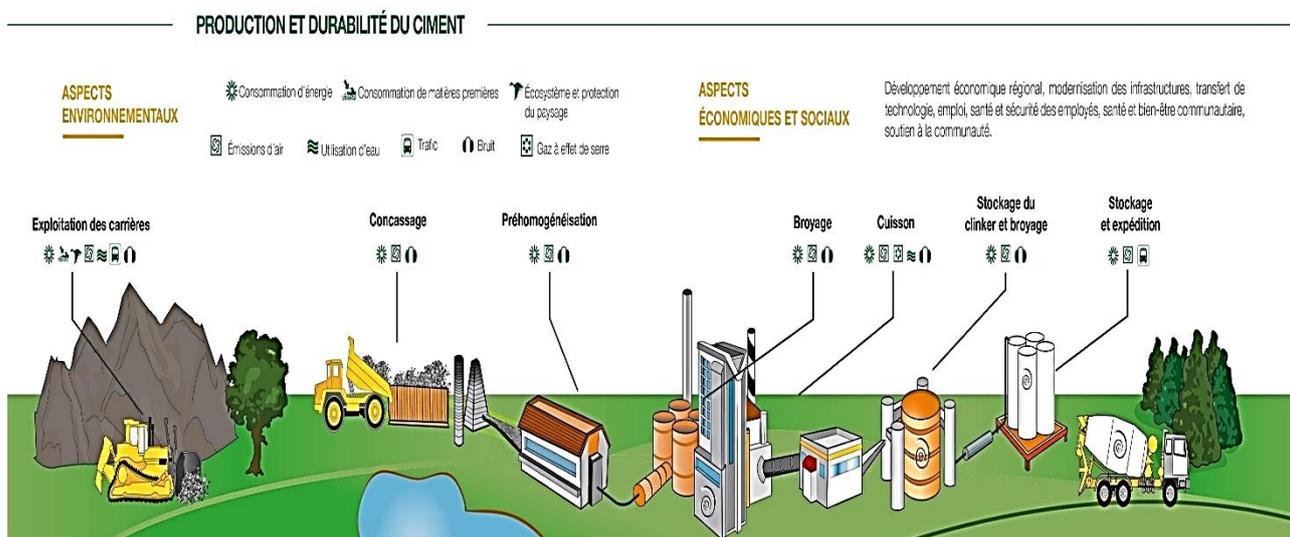


Figure I.4 : Procédé de fabrication de ciment. [10].

I.2.2. Effet de la fabrication du ciment sur l'environnement :

Dans le secteur de la production de ciment, les émissions majeures dans l'atmosphère proviennent principalement des gaz de combustion émis lors du processus de cuisson. Cependant, les émissions de poussières sur l'ensemble du cycle de production du ciment sont particulièrement préoccupantes. La production du clinker, qui précède la fabrication du ciment, est l'étape la plus cruciale dans l'industrie du ciment, mais elle génère également le plus grand nombre d'émissions nocives. Ainsi, les émissions provenant des fours sont à l'origine des principaux polluants relâchés dans l'atmosphère lors de la chauffe du calcaire à une température extrêmement élevée [8].

En 2018, la production de ciment à l'échelle mondiale s'est élevée à 3,9 milliards de tonnes [11]. Cependant, le processus de fabrication du ciment, qui repose sur la clinkérisation, est à l'origine d'une émission mondiale annuelle de CO₂ estimée à près de 2 milliards de tonnes. Conformément à la stratégie 5C du CEMBUREAU, le secteur européen du ciment ambitionne d'atteindre la neutralité carbone sur l'ensemble de la chaîne de valeur procédés ciment-béton d'ici l'horizon 2050 [12].

I.3. Propriétés des ciments avec ajouts :

Selon les données expérimentales étudiées par Benia et al [13], il apparaît que l'amélioration de la réactivité latente des ajouts minéraux et l'augmentation de la résistance mécanique des mortiers et bétons sont principalement dues à l'agrandissement de la surface spécifique ainsi qu'à la composition (chimique et minéralogique) des ciments contenant des ajouts minéraux.

Paillere et Raverdy [14] ont révélé que l'existence de ces ajouts semble avoir une influence positive sur le retrait et la fissuration ainsi que la résistance à une teneur de 10 % de fines calcaires ou siliceuses, On commence à observer des déclin significatifs de résistance lorsque les niveaux varient entre 20 et 35%, Boubekour et al [15] montrent que l'intégration de 20 à 30 % de laitier conduit à une significative des caractéristiques mécaniques et de la résistance aux agents chimiques.

I.3.1 Ciment à base de laitier :

Les produits laitiers de haut-fourneau sont essentiellement des substances vitrifiées, dérivées du processus de production de la fonte où les minéraux de fer (tels que l'Hématite Fe₂O₃ ou la Magnétite Fe₃O₄) sont réduits par le coke (qui sert à la fois de combustible et d'agent réducteur), qui permet d'obtenir de la fonte (un alliage fer-carbone riche en carbone ; Fonte = pig-iron). Les minerais de fer sont toujours liés à une gangue d'oxydes et de silicates, créant ainsi des scories qui, sous l'action de la chaleur, s'agglomèrent par fusion. Effectivement, dans le processus de métallurgie, la température élevée dans le haut fourneau permet de faire fondre les matériaux.

La fonte a une densité de 7, tandis que le laitier se situe autour de 3. Par conséquent, les deux liquides en fusion se séparent en raison de leur densité respective : la fonte résiduelle reste à la base du four tandis que le laitier (liquide silicaté fondu) forme le « surnageant » au niveau supérieur. Cela permet son élimination aisée par une « veine » qui facilite l'écoulement du liquide en fusion vers un éclateur puis vers une fosse à eau où il est rapidement refroidi (trempe) et solidifié pour former un matériau vitreux qui peut être extrait sous forme de

sable. Les produits laitiers de haut-fourneau possèdent un potentiel hydraulique nécessitant une activation par calcium ou sulfate de calcium, ce qui confère aux ciments qui les incorporent une résistance renforcée face aux agents chimiques agressifs. Après avoir été finement broyé, le laitier vitrifié de haut fourneau peut constituer un élément majeur du ciment en dehors du clinker, ou être incorporé comme complément dans le béton. [16]

La recherche faite par Neville M. [17] dit que le ciment à base de laitier est de résistance plus que le ciment Portland à partir de pourcentage de teneur au laitier.

I.3.2 Ciment à base de pouzzolane (locale) :

La pouzzolane naturelle employée provient du gisement volcanique de Bouhamidi, localisée au sud de Béni-Saf. Le gisement est symbolisé par une montagne conique nommée El-Kalcoul, qui se trouve à l'altitude précise de 236 m. Cette pouzzolane se compose principalement de scories et de pierres ponce soigneusement stratifiées, dont la couleur oscille entre le rouge et le noir [18]. Dans tous les essais, la pouzzolane naturelle employée est présentée sous forme de poudre, obtenue à partir du broyage des scories pouzzolaniques. Celles-ci sont d'abord étuvées pendant 24 heures à une température de 50°C pour éliminer leur humidité, puis elles sont broyées jusqu'à obtenir une poudre suffisamment fine. [18]

Tableau I.1 : Composition chimique élémentaire de la pouzzolane naturelle de Beni-Saf [19].

| Eléments | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | CaO | Fe ₂ O ₃ | MgO | SO ₄ | Cl | P.F |
|-------------|------------------|--------------------------------|------|--------------------------------|------|-----------------|----|------|
| Teneur en % | 45.21 | 17.85 | 9.99 | 9.84 | 4.38 | / | / | 3.91 |

I.3.3 Ciment à base de fumée de silice :

C'est un sous-produit de la fabrication du silicium récupéré dans le système de dépolluage des fumées. D'un point de vue chimique, la fumée de silice est composée essentiellement de silice, sa teneur varie selon le type d'alliage produit. Les particules de la fumée de silice se présentent sous forme sphérique avec des diamètres allant de 0,1 µm à 1 ou 2 µm, de telle sorte qu'une particule de fumée de silice est 100 fois plus petite qu'un grain de ciment. La fumée de silice a des effets bénéfiques sur la microstructure et les propriétés mécaniques du béton qui sont dus à l'effet filler et à la réaction pouzzolanique. [20]

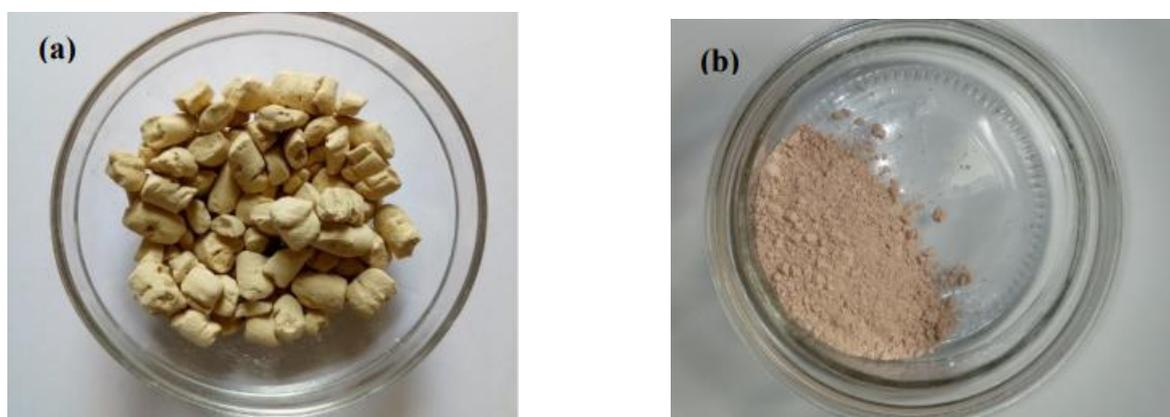
Tableau I.2 : Composition chimique de fumée de silice [21].

| Elément s | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | CaO | Fe ₂ O ₃ | MgO | SO ₃ | K ₂ O | Na ₂ O | P ₂ O ₅ | P.F |
|-------------|------------------|--------------------------------|------|--------------------------------|------|-----------------|------------------|-------------------|-------------------------------|------|
| Teneur en % | 90,95 | 0,16 | 0,50 | 0,45 | 1,28 | 0,23 | 2,50 | 0,80 | 0,01 | 3.13 |

I.3.4 Ciment à base de métakaolin :

On obtient les métakaolins en calcinant l'argile kaolinique (silicate d'alumine hydraté) à des températures variant de 600 à 900 °C. La température de calcination influence le niveau de pureté du kaolin, également connu sous le nom de kaolinite. La déshydroxylation et la destruction de la structure cristalline du kaolin résultent de la calcination. Ce qui est créé, c'est de la métakaolinite (kaolinite calcinée). Le traitement thermique appliqué dure cinq heures au maximum.

On obtient la métakaolinite avec un pourcentage de déshydroxylation du kaolin à un taux inférieur à 88 %. La composition stœchiométrique est la suivante : $Al_2O_3(SiO_2)_2(H_2O)_{0,24}$. En fonction de la pureté du kaolin d'origine, le métakaolin formé peut inclure d'autres phases minérales comme la silice ou la muscovite. [22]

**Figure I.5** : Photo de kaolin (a) et de Métakaolin (b) [23].

I.3.5 Ciment à base de filler de calcaire :

Les fillers calcaires sont des matières sèches et extrêmement fines issues du broyage, du sciage, du découpage ou d'autres méthodes appliquées à la roche calcaire naturelle. Ils se manifestent comme des poudres fines majoritairement constituées de cristaux rhomboédriques de calcite ($CaCO_3$), de dolomite ($(Ca,Mg)_2CO_3$) et de quartz (SiO_2). On retrouve souvent des carbonates tels que la sidérite ($FeCO_3$), l'ankérite ($Ca_2MgFe(CO_3)_4$)

et la magnésite (Mg_2CO_3) en proportions réduites dans les dépôts. Conformément à la norme EN933-10, le diamètre maximal des particules ne doit pas excéder 2 mm, et au minimum 70 % d'entre elles doivent s'écouler à travers une maille de 63 μm .

Leur surface spécifique est habituellement comparable à celle du ciment. Lorsqu'ils sont incorporés aux composants cimentiers, ils fonctionnent comme des points de nucléation et de germination pour les hydrates. Ces fillers calcaires sont couramment employés dans la production de ciments composés (CEM II/A ou B – L), et ils sont utilisés dans la fabrication du béton, et le béton autoplaçant [20].



Figure I.6 : filler calcaire

I.3.6 Ciment à base de cendre de boues :

Avant le processus d'incinération, les boues d'épuration sont séchées pendant une durée de 24 heures dans un four à 100°C afin de garantir que les échantillons soient bien secs.

Les boues d'épuration sont brûlées à l'aide d'une technique à couvercle hermétique, afin de garantir que toutes les cendres issues des boues d'épuration sont totalement confinées au sein de la coupelle. Les boues d'épuration sont soumises à une incinération allant de la température ambiante jusqu'à un maximum de 600°C pendant une durée de trois heures. La durée pour atteindre 600°C depuis la température ambiante est d'environ 15 minutes, tandis que le temps requis pour descendre de 600°C à 200°C est autour de 5 heures.

On extrait les résidus des boues d'épuration de l'incinérateur à une température d'environ 200°C et on les entrepose dans un récipient. [24]



Figure I.7 : cendre de boues

I.3.7 Ciment à base de cendre volante :

Dans les centrales thermiques, le charbon broyé traverse une zone de température extrêmement élevée lorsqu'il est brûlé. Les éléments volatils et le carbone sont incinérés, alors que les impuretés minérales comme l'argile, le quartz et les feldspaths sont fondus. Les produits à fondus sont rapidement dirigés vers la zone plus fraîche où ils se solidifient en petites sphères de verre. La plupart de ces sphères sont entraînées par le flux gazeux vers l'extérieur. On récupère ces cendres à l'aide d'un précipitateur électrostatique.

La composition chimique et physique des cendres volantes peut varier en fonction des impuretés présentes dans le charbon utilisé.

Les particules de C.V se caractérisent par des sphères minuscules dont le diamètre varie de 1 μm à 200 μm (avec 50 % ayant un diamètre inférieur à 30 μm). Leur surface spécifique Blaine se situe entre 250 et 400 m^2/kg (plage similaire à celle des ciments). La structure et la taille des cendres volantes influent de manière significative sur la maniabilité et le besoin en eau des bétons frais. [25]

Tableau I.3 : Composition chimique des C.V obtenue à partir de différents types de charbon [25].

| | Anthracite | Bitumineux | Sous-bitumineux | Lignite |
|--------------------------------|------------|------------|-----------------|---------|
| SiO ₂ | 47-68 | 7-68 | 17-58 | 6-45 |
| Al ₂ O ₃ | 25-43 | 4-39 | 4-35 | 6-23 |
| Fe ₂ O ₃ | 2-10 | 2-44 | 3-19 | 1-18 |
| CaO | 0-4 | 1-36 | 2-45 | 15-44 |
| MgO | 0-1 | 0-4 | 0-8 | 3-12 |
| Na ₂ O | - | 0-3 | - | 0-11 |
| K ₂ O | - | 0-4 | - | 0-2 |
| SO ₃ | 0-1 | 0-32 | 3-16 | 6-32 |

I.3.8 Ciment à base de poudre de verre :

Cette poudre provient du recyclage des bouteilles en verre. On obtient la poudre de verre en ne sélectionnant que les bouteilles de teintes vertes et blanches. Ces dernières sont purgées pour supprimer les étiquettes en papier, séchées, réduites en morceaux puis finement moulues. Le tableau I.4 et la figure I.9 illustrent la composition chimique et les résultats de l'analyse granulométrique par Laser de la poudre de verre, indiquant que plus de 60 % des particules présentent un diamètre inférieur à 100 μm . La surface spécifique correspond à 3600 cm^2/g . [26]

Une mouture fine du verre suggère une possibilité d'utilisation comme liant [27]. Ici, la silice présente dans le verre interagit avec les chaux générées lors de la réaction du ciment, ce qui donne naissance à des composés dotés de caractéristiques liées : on parle alors de réaction pouzzolanique. La Figure I.10 illustre les résistances comparatives (proportion des résistances des mortiers contenant et ne contenant pas de verre) en fonction de la surface spécifique du verre jusqu'à 210 jours de séchage, pour des mortiers où le ciment est substitué par du verre à divers taux (10, 20, 30 et 40%).

Il a été observé que jusqu'à 30% de verre, les résistances comparatives dépassent les courbes inertes (sauf pour un jour), ce qui indique qu'il existe une activité significative pour tous les calibres de particules de verre, y comprenant les plus grandes. Pour une durée d'un jour et avec une proportion de 10% de verre, l'impact de la finesse est marginal. Toutes les catégories de verre présentent des résistances relatives similaires par rapport à la courbe de dilution.

La classe la plus fine se distingue des autres courbes sur le long terme (90 et 210 jours). Cela implique que le ciment peut être substitué par n'importe quelle dimension de verre sans affecter l'activité, la résistance relative demeurant constamment au-dessus de 90% dans toutes les situations. [28]



Figure I.8 : poudre de verre

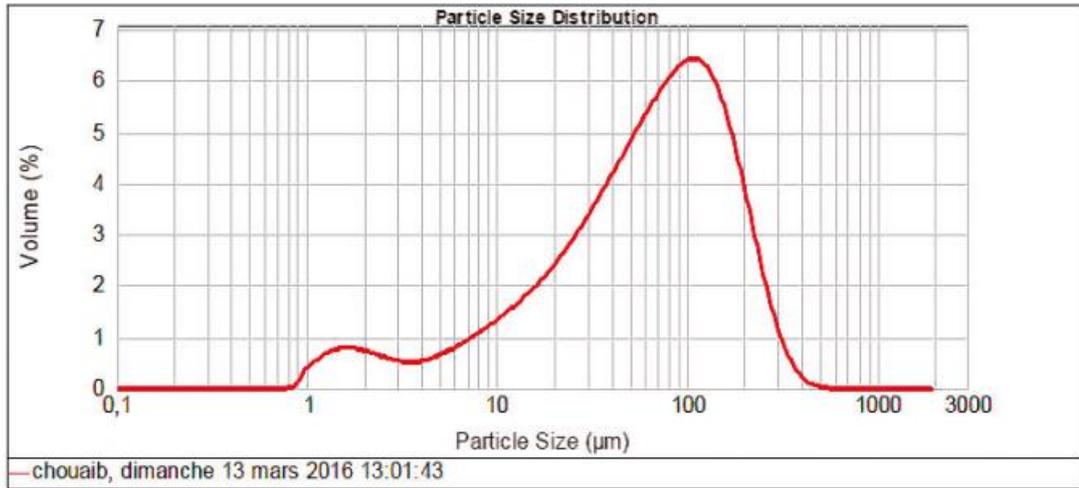


Figure I.9 : Analyse granulométrique par laser de la poudre de verre. [26]

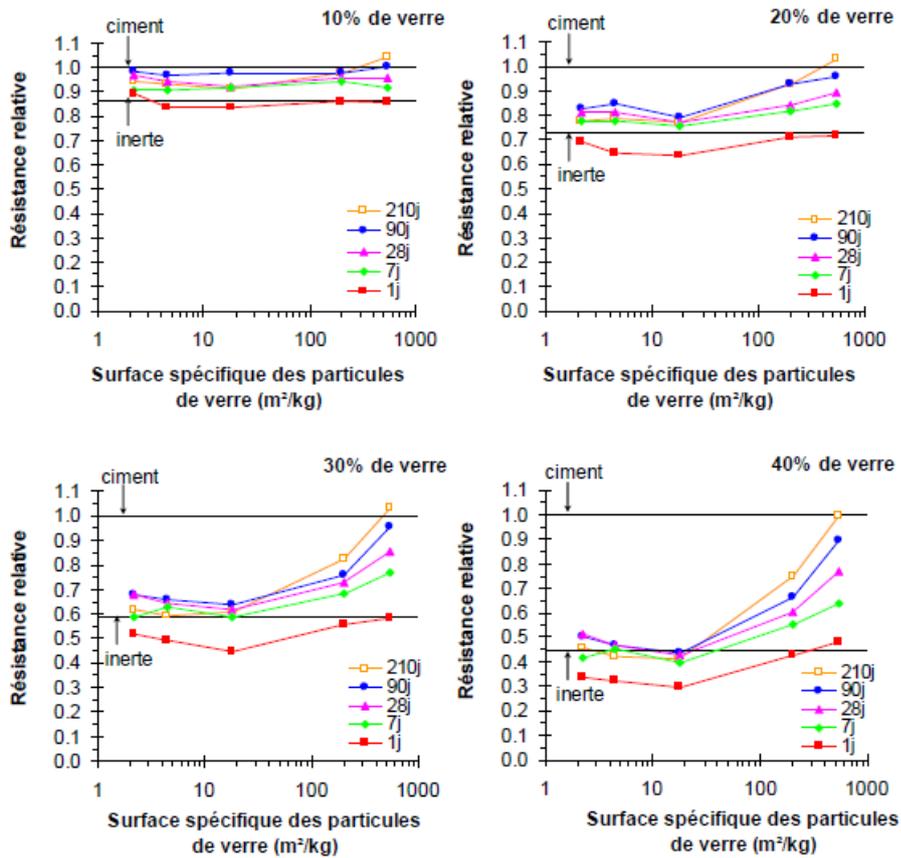


Figure I.10 : Résistances relatives (%) des mortiers en fonction des finesses du verre. Comparaison avec les courbes de dilution obtenues par la loi de Bolomey. Mortiers préparés avec différents remplacements (10, 20, 30 et 40%) de ciment par les classes de verre C1, C2, C4, C6 et C8. Cure : T = 20°C, 100 % HR. [29]

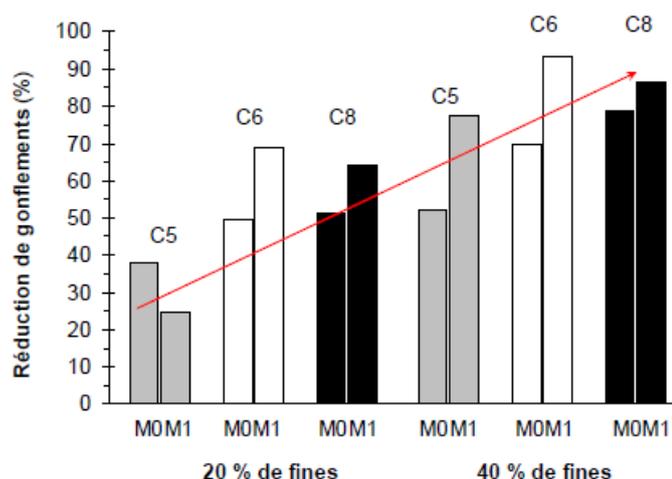


Figure I.11 : Effet des fines de verre (C5, C6, C7, C8) sur la réduction des gonflements de mortiers (M0, M1) fabriqués avec 20 % de granulats de verre (C0, C1), selon une cure de 43 semaines à $T = 60^{\circ}\text{C}$ et 100 % HR. Les fines de verre sont utilisées en remplacement de 20 et 40 % de ciment et les granulats de verre en remplacement de 20 % du sable). [30]

(C1, C2, C4, C5, C6, C7, C8) : Les différents classe de verre en termes de surface spécifique et diamètre des particules.

Tableau I.4 : Compositions chimiques poudre de verre. [26]

| Oxydes (% par masse) | Poudre de verre |
|--------------------------------|-----------------|
| SiO ₂ | 70,50 |
| Al ₂ O ₃ | 1,42 |
| Fe ₂ O ₃ | 0,10 |
| Ca O | 8,43 |
| Mg O | 4,01 |
| Na ₂ O | 15,28 |
| SO ₃ | 0,25 |
| Perte au feu | 0,22 |

I.4. Effet de ciment avec ajout sur mortier autoplaçant :

I.4.1. Effet de ciment à base de filler de calcaire sur mortier autoplaçant :

Des recherches fait par R. Chaid et al [31] disent que Les fillers de calcaire combler les interstices entre les particules de ciment et renforcent la densité du béton. Cette action pourrait entraîner une diminution de la porosité (et donc de leur perméabilité) et par

conséquent, une hausse de leur résistance chimique face à l'environnement corrosif (l'eau de mer).

Il a été démontré que les ciments enrichis par des fillers de calcaire développent une résistance à la compression à court terme (2 et 7 jours) comparable au ciment sans adjonction (témoin). Cependant, sur le long terme (28 jours), ces dernières ont une influence faible qui dépend du pourcentage croissant de filler de calcaire. En raison de ses caractéristiques d'ajout inerte, le coefficient d'absorption de l'eau par capillarité diminue lorsque les charges de calcaire sont incorporées au ciment résistant aux sulfates. Cela s'applique également aux temps de début et de fin de prise. [32]

I.4.2. Effet de ciment à base de laitier de haut fourneau sur mortier autoplaçant :

L'incorporation de laitier granulé broyé améliore l'ouvrabilité du béton frais, le rendant plus plastique et favorisant une meilleure cohésion [17, 33].

BROOKS et al [34] ont observé ce phénomène dans les bétons à haute résistance, où l'incorporation de 40 à 60% de laitier a notablement prolongé le début et la durée de prise.

La présence de 40 % de laitier a entraîné une réduction significative du retrait de séchage après une période de 180 jours [35].

I.4.3. Effet de ciment à base de pouzzolane sur mortier autoplaçant :

Selon l'analyse menée par O. Chaib et al [19], il est démontré que la consistance augmente proportionnellement aux taux d'ajouts, c'est-à-dire que plus le taux s'accroît, plus la consistance se renforce.

La résistance de ces mortiers à base de pouzzolane se développe, mais demeure en dessous de celle du mortier témoin, et ce pour toutes les périodes .

à jeune âge, une augmentation du taux d'ajout influence négativement la résistance à la compression et à la flexion, mais à long terme, la résistance s'améliore.

À long terme, avec un taux de pouzzolane de 20 %, la résistance à la compression se rapproche de celle du mélange témoin.

I.4.4. Effet de ciment à base de fumée de silice sur mortier autoplaçant :

Selon l'étude menée par GADRI et al [36], une progression est observée de la résistance à la compression du béton contenant 5% de F.S qui a augmenté de 49 MPa à 28 jours pour

atteindre 55 MPa à 90 jours. Pour ce qui est de la résistance à la traction, en utilisant le même pourcentage de FS, nous avons obtenu le meilleur résultat avec 8,2 MPa au bout de 28 jours.

Chahrazad Oubraham et al [21] dit que tous les coulis de ciment examinés à divers taux de substitution présentent une densité quasi stable. La porosité des coulis avec de la fumée de silice n'est pas fixe. L'emploi d'ajouts favorise l'obturation des pores, ce qui aide à maintenir l'intégrité du réseau granulaire et contribue à obtenir une résistance élevée.

L'effet de la substitution du ciment par la fumée de silice sur la rhéofluidification du coulis de ciment est négligeable.

TOUTANJI, HA et al [37] fait l'étude sur quatre proportions d'eau et de ciment : 0,22, 0,25, 0,28, et 0,31. Les dosages de fumée de silice représentent respectivement 8%, 16% et 25% du ciment. Pour chaque formulation, l'ajustement du dosage du superplastifiant a été effectué dans le but d'éviter la ségrégation. L'étude a démontré qu'un remplacement partiel de 8% du ciment par de la fumée de silice entraîne une diminution de la résistance à la traction du mortier, tandis qu'aucun impact n'a été observé sur la résistance à la traction de la pâte de ciment. L'utilisation d'une grande quantité de fumée de silice (16% et 25%) en substitution du ciment provoque une diminution de la résistance à la traction tant du mortier que de la pâte cimentaire. Cette réduction a été plus marquée pour le ciment que pour le mortier. On a également prouvé que l'emploi du superplastifiant combiné à de la fumée de silice est plus efficace dans le mortier que dans la pâte de ciment. Ceci peut être dû à une répartition plus efficace des particules de fumée de silice dans le mortier.

I.4.5. Effet de ciment à base de métakaolin sur mortier autoplaçant :

D'après les travaux effectués par Mansour Mohamed Saïd [38] sur le métakaolin, il a examiné la calcination d'un kaolin local à différentes températures (650, 750, 850 et 950 °C) ainsi que sur différentes durées (2, 3 et 4 heures). Ce processus a généré un métakaolin présentant une forte activité pouzzolanique. Il a mesuré l'activité pouzzolanique en évaluant la chaleur d'hydratation et la résistance à la compression après 28 jours. L'activité la plus élevée a été atteinte à 850 °C pendant une période de 3 heures. Les observations indiquent que remplacer 10% du ciment par du métakaolin augmente la chaleur d'hydratation et renforce la résistance à la compression. L'emploi conjoint du filler calcaire et du métakaolin pour la fabrication d'un ciment ternaire a renforcé la résistance à la compression à court terme et sur le long terme. Une meilleure résistance aux acides a également contribué à l'amélioration de la durabilité, mais SALHI [23] dit que MK conduit à une augmentation

considérable de la demande en eau et superplastifiant pour obtenir les mêmes caractéristiques rhéologiques que le mortier et le béton de référence. En ce qui concerne les paramètres de durabilité du béton, il a montré l'impact bénéfique du MK sur la diminution du retrait lors du séchage, ainsi que sur l'amélioration de la résistance du béton face aux sulfates. Toutefois, une croissance de la profondeur de carbonatation et une résistance réduite à l'acide sulfurique par rapport au béton dépourvu de MK.

I.4.6. Effet de ciment à base de mâchefer de charbon minérale sur mortier :

Selon les résultats de Edem BAITE et al [39] la carbonatation de 28 jours des échantillons contenant 20% de CO₂ donne l'importante porosité des mortiers riches en mâchefer qui augmente considérablement la profondeur de carbonatation par rapport au mortier témoin. L'apparition de nouveaux cristaux de calcite dans la microstructure colmate celle-ci, rendant les composites avec mâchefer moins perméables.

Les résultats des essais mécaniques indiquent une augmentation de la résistance à la compression et à la traction due à la densification des composites à base de mâchefer.

I.5. Le biochar :

I.5.1. Histoire sur l'utilisation du charbon :

La véritable industrialisation du charbon actif débute au début du XX^e siècle afin de satisfaire les exigences des raffineries sucrières. Ces premiers charbons actifs sont produits par la carbonisation de matières végétales. La production de charbons actifs augmente durant la Première Guerre mondiale à cause de l'usage croissant des gaz toxiques et de l'évolution des masques à gaz. À l'heure actuelle, la production annuelle globale de charbons actifs s'élève à 420 000 tonnes. La nature non discriminatoire des charbons actifs leur garantit une position privilégiée sur le marché des adsorbants, malgré l'arrivée récente de nombreux concurrents, notamment les zéolites. [40]

I.5.2. Définition de biochar :

Le biochar est une matière riche en carbone qui peut être produite à partir de divers déchets organiques, tels que les résidus agricoles et les boues d'épuration municipales. Le biochar a suscité un intérêt croissant grâce à ses caractéristiques uniques telles que sa teneur élevée en carbone, sa capacité d'échange cationique élevé, et sa structure stable. Les caractéristiques physico-chimiques du biochar varient en fonction des types de matières premières utilisées.

La pyrolyse, la gazéification et la carbonisation hydrothermale sont les méthodes courantes pour la préparation du biochar. Le biochar peut être modifié par des acides, des alcalis, des agents oxydants, des ions métalliques, des matériaux carbonés, de la vapeur. En génie civil il est utilisé comme ajout afin de réduire les émissions des gaz à effet de serre grâce à sa capacité d'absorption. [41]

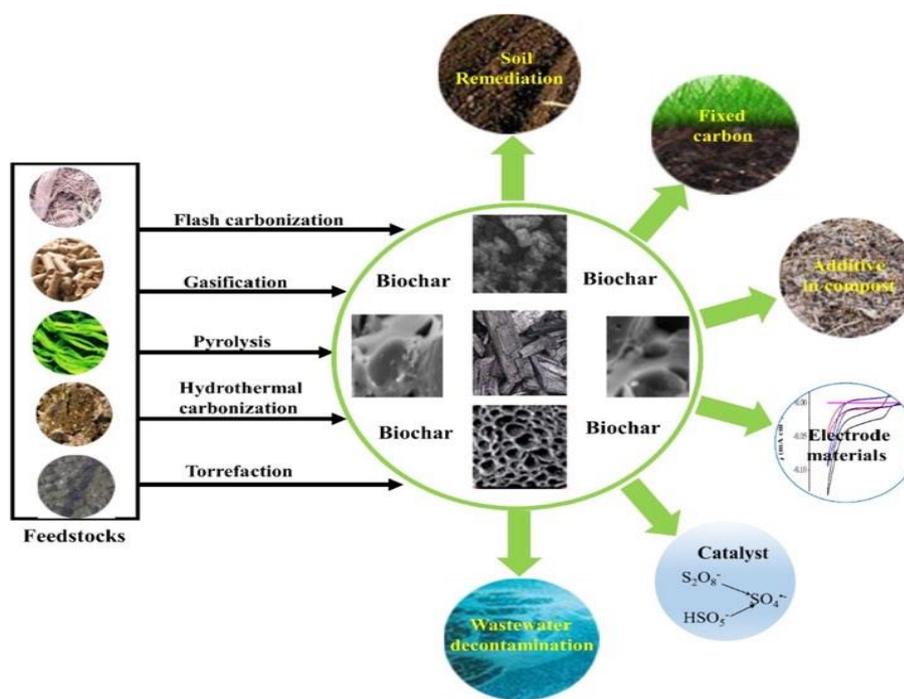


Figure I.12 : Type de fabrication de biochar [41]

I.5.3. Adsorption :

I.5.3.1 Définition :

L'adsorption est un processus physico-chimique d'interface susceptible de se produire entre un solide et un gaz ou entre un solide et un liquide, entraînant ainsi l'amasement des molécules du soluté (adsorbat) sur la surface du solide (l'adsorbant) [42]. L'adsorption est un processus physique d'extraction de composants des mélanges qui autorise le remplacement d'une substance par une autre dans la phase où elle se situe [43]. Dans notre cas l'adsorbant est le biochar et l'adsorbat est les CO_2

I.5.3.2 Classification de phénomène d'adsorption :

- **Adsorption physique :**

L'adsorption physique, également connue sous le nom d'adsorption de Van der Waals, est un processus réversible qui découle des forces intermoléculaires d'attraction entre les molécules du matériau solide et celles de la substance adsorbée. Ce processus est régulé par la diffusion des molécules qui atteint son équilibre rapidement (de quelques secondes à quelques minutes). Cependant, pour les adsorbants microporeux, il peut se prolonger pendant de très longues périodes à cause du ralentissement de la diffusion de l'adsorbat à travers leurs structures dont les dimensions sont proches du diamètre des molécules de l'adsorbant.

La physisorption est un processus non sélectif qui entraîne la création de multicouches : la couche initiale résulte des interactions entre l'adsorbat et l'adsorbant, tandis que les couches subséquentes sont dues aux interactions entre les adsorbats eux-mêmes (Figure I.13). [44].

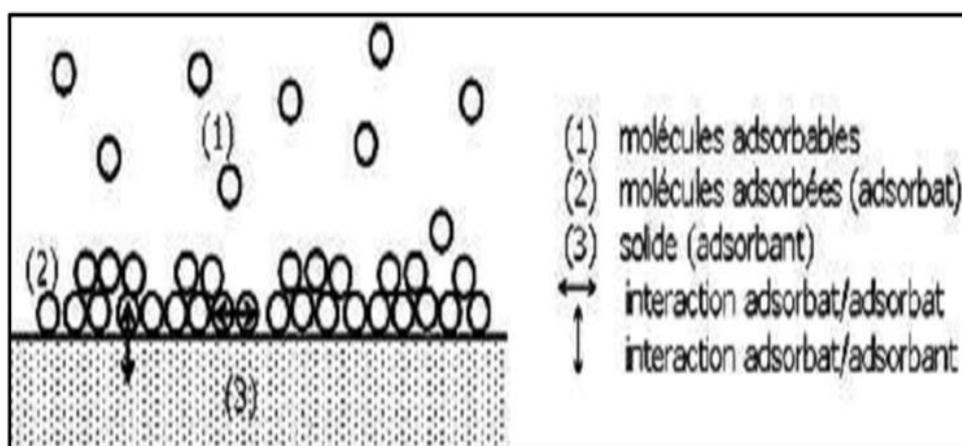


Figure I.13 : Schéma de l'adsorption physique

- **Adsorption chimique :**

Également connue sous le nom de chimisorption ou d'adsorption activée, ce phénomène irréversible est dû à une liaison chimique forte du type covalent qui se forme entre les atomes de surface du solide et les molécules adsorbées. Ce genre d'adsorption implique des énergies d'attraction fortes, entraînant des chaleurs d'adsorption élevées, qui se rapprochent souvent des énergies de liaisons chimiques covalentes allant de 20 à 80 kcal/mol [45]. Selon Weber

[46], l'adsorption chimique ne se rapporte qu'à une petite partie de la surface totale à l'intérieur des particules de charbon.

I.5.4. Fabrication de biochar :

La recherche faite par Bachir-SAID [47] ont fabriqué le biochar par la carbonisation (pyrolyse) produite par un four tubulaire (Nabertherm GmbH) en présence d'azote à une température de 550 °C, la vitesse de chauffage est fixée à 10 °C/min pendant deux heures. Cependant, BOUTAIEB [48] ont utilisé une autre méthode : la pyrolyse rapide de noyaux d'olive faite par un traitement à 600 °C pendant 30 minutes génère un rendement en biochar de 26,8 % avec un pouvoir calorifique supérieur de 32,09 MJ/kg, idéal pour des usages énergétiques.

I.5.4.1 Procédés de conversion thermochimique de la biomasse :

Les procédés thermochimiques se basent sur une conversion de la biomasse par effet de la chaleur en énergie thermique (chaleur) ou en combustibles solide, liquide et gazeux. Ils incluent les procédés thermochimiques secs (combustion, pyrolyse et gazéification).

➤ Combustion :

La combustion est une méthode permettant d'extraire l'énergie chimique contenue dans la biomasse sous forme de chaleur, en la brûlant directement en présence d'oxygène ou d'air. La biomasse est brûlée à une température variant entre 800 et 1000 °C, convertissant quasiment toute l'énergie chimique en énergie thermique et ne laissant aucune partie non transformée dans les gaz de combustion, avec seulement une quantité minimale non convertie se retrouvant dans les cendres. Bien que la biomasse de toute sorte puisse être brûlée, cela n'est possible que si son taux d'humidité est inférieur à 50 % [49].

➤ Gazéification :

La gazéification est un procédé thermochimique au cours duquel les éléments carbonés de la biomasse sont transformés en un combustible gazeux lorsqu'ils sont en contact avec des agents gazeux tels que l'oxygène, l'air, l'azote, le dioxyde de carbone, la vapeur ou une combinaison de ces derniers à une température élevée variant entre 700 °C et 900 °C [50]. Au cours de cette procédure, l'énergie chimique inhérente au carbone contenu dans la

biomasse est transformée en gaz combustibles, offrant une utilisation plus efficace et aisée comparativement à la biomasse brute.

On désigne généralement le gaz issu de la gazéification par le terme « bio-syngaz ». Ce bio-syngaz est essentiellement constitué de CO, CO₂, H₂ et N₂. Le résidu post-gazéification se compose de charbon solide, de cendres, de goudron et d'une petite quantité d'huile. La gazéification est une technique très performante pour générer du H₂ à partir de biomasse, tant au niveau du laboratoire que pour la production d'hydrogène à grande échelle [51].

➤ **Pyrolyse :**

La pyrolyse est une procédure thermo-chimique où la biomasse se décompose chimiquement sous une atmosphère inerte [52] à des températures habituellement situées entre 350 et 1000 °C, en l'absence d'oxygène [53]. Cette opération aboutit généralement à la création de trois fractions distinctes : une fraction gazeuse non condensable, composée majoritairement de CO, CO₂, CH₄ et H₂ ; une fraction liquide (biohuile ou mélange d'hydrocarbures lourds), ainsi qu'un résidu solide souvent appelé « coke », « char » ou « biochar » [54].

Le rendement du produit est influencé non seulement par les caractéristiques de la biomasse employée, mais également de manière significative par les conditions d'exploitation telles que la vitesse de chauffe, la température finale et la durée de séjour [55]. On identifie donc trois catégories de pyrolyse en fonction du rythme de chauffage :

A. Pyrolyse lente :

La pyrolyse lente est la forme traditionnelle de pyrolyse, se distinguant par un réchauffement progressif et une durée d'exposition prolongée. La biomasse est pyrolysée à une température avoisinant 550 à 650°C et l'on fait appel à une vaste variété de granulométrie (5-50 mm) [56]. Le processus de décomposition thermique de la biomasse s'effectue généralement à un taux d'apport calorifique très bas (< 10 kW/m²), ce qui offre une durée adéquate pour l'exécution des réactions de repolymérisation et résulte en une élévation de la productivité de la phase solide.

B. Pyrolyse rapide ou flash :

La pyrolyse rapide, également connue sous le nom de pyrolyse flash, est un type de pyrolyse qui se déroule à des températures variant entre 850 et 1300°C [57]. La particularité de la réaction totale est sa durée qui ne dépasse pas quelques secondes. Elle est réalisée dans des

conditions de flux thermique externe à haute densité ($> 10 \text{ kw.m}^{-2}$). Elle entraîne une production diminuée de biochar et privilégie la formation prédominante des phases liquides et gazeuses en proportions qui varient en fonction de la température et du temps que les vapeurs passent dans le réacteur, à cause de la présence de réactions secondaires de craquage [58].

Tableau I.5 : Condition opératoires selon les différents types de pyrolyse [59]

| Types de pyrolyses | Plage de température (°C) | Vitesse de chauffe | Pression | Temps de séjour | Produit principale |
|--------------------|---------------------------|--------------------|----------------------|-----------------|--------------------|
| Pyrolyse lente | 350 - 800 | Lente | Atmosphérique | Heures à jour | Charbon |
| Pyrolyse rapide | 400 - 600 | Très rapide | Vide – atmosphérique | Secondes | Goudron |
| Pyrolyse flash | 300 - 800 | Rapide | Elevée | Minute | Solide carboné |

I.5.5. Propriétés physicochimiques d'un biochar :

Le biochar est constitué d'éléments produits par la carbonisation de la biomasse. Selon les températures qu'on atteint pendant la pyrolyse et le type de biomasse initiale, les caractéristiques physiques et chimiques du biochar produit peuvent fluctuer [60,61]. Le biochar possède diverses caractéristiques physiques et chimiques qui en font un atout pour les sols agricoles, à savoir :

I.5.5.1 Propriétés physique :

I.5.5.1.1 Surface spécifique :

La surface spécifique du biochar, qui peut varier, dépend de la température et des conditions de pyrolyse. Essentiellement, cette surface est générée par les micropores et mésopores. Plus la surface spécifique est importante, plus la superficie de contact augmente et plus le volume de matières adsorbées se révèle important. Ce paramètre est dérivé en utilisant la théorie de Brunauer, Emmet et Teller, d'où son nom de surface BET [62].

I.5.5.1.2 Porosité :

Le biochar est composé de milliers de pores qui se forment durant le processus de pyrolyse. C'est pourquoi il a la capacité d'adsorber jusqu'à cinq fois son poids en eau et les nutriments qu'elle contient sous forme diluée [63]. On désigne cette propriété sous le terme de capacité d'adsorption du biocharbon. Cette faculté dépend du genre de biomasse pyrolyse et de la température de pyrolyse [64].

I.5.5.1.3 Densité :

La biomasse utilisée et la température de production influencent la densité du biochar. Toutefois, de façon générale, elle fluctue entre 0,2 et 0,8g/cm³ le biochar utilisé comme un améliorant des sols. L'incorporation d'un biochar de faible densité dans le sol permet de l'améliorer sous deux aspects : en premier lieu, cela diminue la densité massive du sol, facilitant ainsi la pénétration des racines des plantes pour une croissance optimale ; en second lieu, cela favorise une importante rétention d'humidité [65].

I.5.5.2 Propriétés chimique :**I.5.5.2.1 PH :**

Le pH du biochar est directement lié à la température de pyrolyse spécifique à chaque type de biomasse végétale. Un biochar généré à une température élevée (700 °C) présente un pH plus élevé comparativement à un biochar produit à basse température (250 °C) [66]. L'élévation de la température de pyrolyse peut stimuler la production de cendres et augmenter la teneur en cations basiques (Na⁺, K⁺, Mg²⁺ et Ca²⁺), qui sont directement liées au pH du biochar [67].

I.5.5.2.2 Capacité d'échange cationique :

Il a été démontré que plus la température de pyrolyse est basse, plus la capacité d'échange cationique est faible [68]. En outre, l'utilisation d'un biochar ayant une grande surface spécifique peut favoriser davantage la capacité d'échange cationique [69]. Une partie de l'attribution de la CEC du biochar est due à une amélioration de l'oxygénation des groupements fonctionnels présents sur sa surface [70]. Ces divers groupes fonctionnels qui interagissent avec l'environnement incluent les groupements pyrannes, phénoliques,

carboxyliques, lactones et amines [71]. Ces groupes peuvent intervenir dans l'assemblage des particules du sol, la matière organique dissoute, ainsi que le déplacement des gaz et de l'eau [72]. D'après certains scientifiques, l'oxydation de la surface du biochar conduirait à une augmentation de la capacité d'échange cationique par unité de carbone [69].

I.5.5.2.3 Composition minérale :

Le type de biomasse employé durant la pyrolyse peut influencer la concentration en minéraux présents dans le biochar [73]. En règle générale, la teneur en minéraux paraît supérieure dans les biochars dérivés d'animaux, de résidus alimentaires et de maïs, par rapport aux biochars issus de produits forestiers (pin, chêne et noix) [74].

I.5.5.2.4 conductivité électrique :

La variation de la conductivité électrique est plus influencée par le type de biomasse que par la température de pyrolyse [74]. Par exemple, le Contenu en Éléments Chimiques (CE) dans des biochars d'origine animale (bovin et volaille) n'a pas montré de variation significative avec l'accroissement de la température de pyrolyse, passant de 300 à 600 °C. À l'exception des résidus de nourriture et des boues de papeterie, la conductivité électrique (CE) des biochars est souvent supérieure dans les biochars d'origine animale (200 à 500 mS.m⁻¹) comparativement à ceux d'origine végétale (3,8 à 203 mS.m⁻¹) [74].

I.5.6 Fabrication de biochar au laboratoire :

I.5.6.1 Préparation de matière première :

En premier lieu on récupère les noyaux d'olive depuis la presse à olive de ben Saleh puis on les lave dans l'eau chaud et du savon pendant 3 jours sans frotter après les 3 jours on frotte contre un tamis pour éliminer les déchets et on le rince ensuite on les mets dans l'étuve pendant 24h.



Figure I.14 : les noyaux d'olives après séchage

L'étape suivante est le broyage de la matière première en utilisant un broyeur puissant pendant 5 min pour obtenir une finesse proche à celle du ciment.



Figure I.15 : l'échantillon après le broyage

I.5.6.2 La pyrolyse :

Enfin on effectue l'opération de la pyrolyse à partir d'un four tubulaire, fabriqué a université de Blida, qui contient le gaz d'azote (gaz inerte) pour éliminer l'hydrogène qui sort avec de l'huile.



Figure I.16 : un four tubulaire (Nabertherm)

Cette opération se fait dans une durée de 1h30 jusqu'au 2h à une température compris entre 400° à 500°. Ensuite après stabilisation il reste 2h30 sous une température constante de 700°.Après on laisse 24h pour le refroidissement et comme ça on obtient le biochar.



Figure I.17 : l'échantillon après la pyrolyse

Tableau I.6 : Composition élémentaire de biochar

| Elément | Proportion en masse (Wt%) | Proportion atomique (At%) |
|----------------|----------------------------------|----------------------------------|
| C | 79.49 | 85.48 |
| O | 16.47 | 13.30 |
| P | 2.66 | 1.11 |
| Ir | 1.28 | 0.09 |
| Ti | 0.10 | 0.03 |

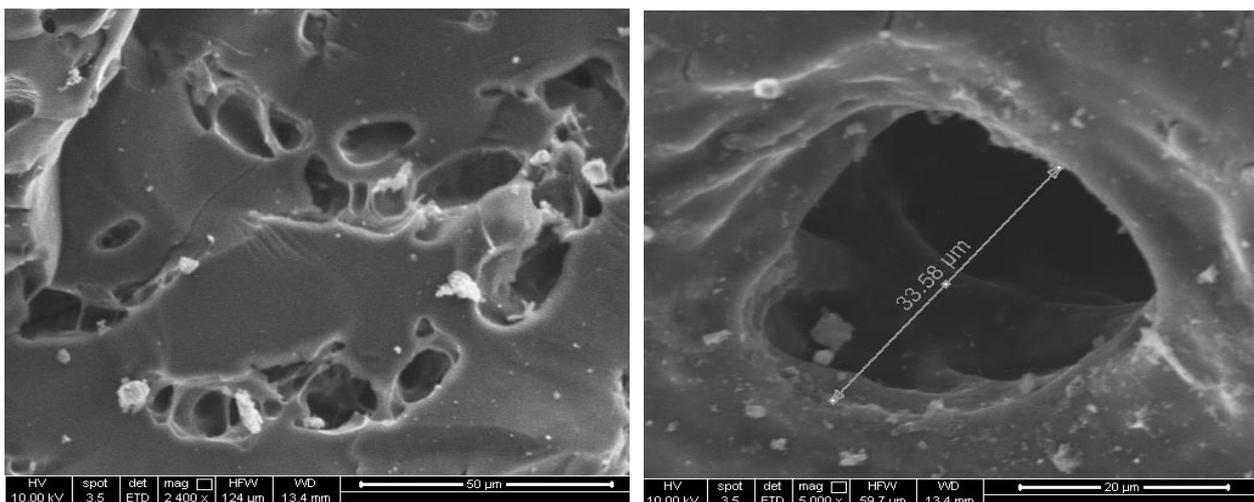


Figure I.18: Caractérisation Morphologique par MEB

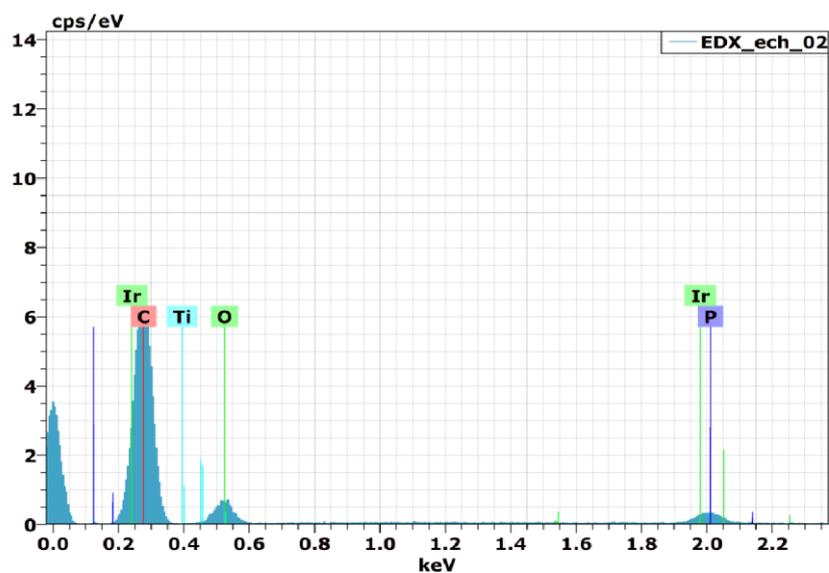


Figure I.19: Analyse EDX

I.5.7 Type de biochar :

Il existe différents types de biochar selon leurs origines :

- **Biochar issu du bois** : Ce type est fabriqué à partir de divers résidus de bois, comme les copeaux de bois, l'écorce et les aiguilles de pin. Il reflète les caractéristiques du matériau d'origine, ce qui le rend approprié pour améliorer la structure du sol et la capacité de rétention d'eau. Par exemple, le biochar provenant d'aiguilles de pin est

reconnu pour son efficacité à éliminer des contaminants tels que le naphthalène et le nitrobenzène de l'eau.

- **Biochar à base de résidus agricoles** : Issu de résidus de culture tels que les tiges de maïs, les balles de riz, la bagasse et les résidus de blé, ce type est efficace pour la rétention d'eau et le piégeage du carbone. Par exemple, selon des études scientifiques, le biochar dérivé des résidus de blé est efficace pour éliminer le benzène et le nitrobenzène des eaux usées.
- **Biochar à base de fumier** : Ce type de biochar est fabriqué à partir de déchets animaux tels que le fumier laitier et le fumier de volaille. Il est riche en nutriments et possède une grande capacité d'échange cationique. Toutefois, une application excessive peut accroître la salinité du sol. Le biochar dérivé du fumier bovin, pyrolysé à une température de 200-300°C, est six fois plus efficace que le charbon actif commercial pour l'élimination du plomb et retire d'importantes quantités d'atrazine des eaux usées.
- **Biochar à base de déchets verts urbains** : Ce type est fabriqué à partir de déchets végétaux urbains tels que les feuilles, les branches et les résidus de jardinage, et vise à réduire au minimum l'interruption des cycles locaux de carbone et de nutriments. Cela est bénéfique pour diminuer les émissions de gaz à effet de serre et pour améliorer la qualité du sol.
- **Biochar à base de produits papier** : Issu des déchets de papier et de la pulpe, ce type est efficace en tant qu'adsorbant pour les polluants dans l'eau, contribuant ainsi aux efforts de traitement des eaux usées.
- **Autres types spécifiques** : D'autres biochars spécialisés comprennent le biochar dérivé des résidus de betterave à sucre, qui élimine 73% du phosphate de l'eau, et le biochar magnétique, efficace pour retirer simultanément les contaminants organiques hydrophobes et le phosphate.

I.5.8 Application de biochar :

- **Traitement de l'eau par biochar :**

La mise au point de réacteurs pilotes ou industriels utilisant le biochar pour le traitement des eaux polluées est d'une importance cruciale, compte tenu du volume considérable d'eaux usées générées chaque jour à l'échelle mondiale. On a rarement publié des recherches sur

l'élimination des polluants organiques et inorganiques dans des réacteurs pilotes utilisant du biochar. Ses collaborateurs ont documenté la suppression des nitrates, des métaux et de faibles quantités de polluants organiques dans les eaux pluviales urbaines grâce à un bioréacteur pilote utilisant des copeaux de bois modifiés au biochar. [75]

- **Agriculture :**

Parmi les résultats de Fatimata SABA [76] L'utilisation du biochar a eu un impact bénéfique sur les rendements du sorgho, ainsi que sur l'humidité du sol, la quantité de carbone, de phosphore et la capacité d'échange cationique. La progression de ces paramètres joue un rôle clé dans la réhabilitation du pouvoir de production des sols encroutés en milieu aride.

Suite à cette recherche et en considérant les conclusions tirées, nous pouvons affirmer que l'intégration du biochar présente la chance d'améliorer la productivité des cultures avec des quantités réduites d'engrais dans les systèmes agricoles du Burkina Faso.

- **Génie civil :**

Rhoda Afriyie Mensah et al [77] ont montré que la substitution de ciment par le biochar a eu des impacts significatifs sur les caractéristiques de béton. La diminution de la quantité de ciment a provoqué une diminution de la capacité d'adhésion, ce qui a conduit à une réduction de la résistance à la compression, de la résistance à la traction ainsi que la rigidité du béton.

Il est à noter aussi que, de manière générale, la diminution de la résistance et du module de Young était plus marquée dans les échantillons où le ciment qui était remplacé que dans ceux où les granulats qui étaient substitués.

I.5.9 Effet du biochar sur le comportement des mortiers et du béton :

I.5.9.1. Substitution de ciment par le biochar :

L'intégration de biochar à hauteur de 20 % dans la masse du ciment rend possible la création de structures résistantes à une exposition au feu de 200 °C. L'intégration de biochar dans les compositions de béton, notamment comme substitution partielle du ciment, propose une méthode progressivement efficace pour diminuer les émissions de CO₂ liées à la construction. Si le biochar représentait 10 % du poids total en substitution du ciment dans la composition du béton, les émissions de dioxyde de carbone associées auraient été réduites de moitié. Cela met en évidence l'attrait prometteur du biochar comme une alternative écologique et durable pour l'industrie du bâtiment. [77]

I.5.9.2. Substitution de sable par le biochar :

La recherche de Qiuyue Zhang et al.[78] a mis l'accent sur le substitut de 1 à 40 % du sable, par le biochar provenant de coques d'abricots, de dattes et de pêches, à un niveau de substitution de 8 %.

Un examen exhaustif a été réalisé sur douze combinaisons, y comprenant un groupe de référence. Concernant les adjuvants à base de biochar et de mortier, une réduction de l'ouvrabilité et de la densité a été notée. L'intégration de 1% de biochar au lieu de sable dans le mortier de béton à ultra-hautes performances (BFUP) a renforcé la résistance à la compression, cependant, une augmentation du dosage en biochar a eu l'effet contraire. Il a été démontré que le biochar-mortier a un double impact sur le retrait au séchage.

Les mélanges contenant un pourcentage supérieur de biochar ont démontré une légère augmentation de la perméabilité. L'ajout de 1% de biochar au BFUP a entraîné une légère diminution de la valeur du flux électrique. Des images SEM ont été réalisées, soulignant la structure morphologique dense enregistrée dans le mortier témoin et celui contenant 1 % de biochar. L'essai MIP a démontré une augmentation de presque 1,6 fois de la porosité à deux dimensions, passant de 10,49 % (échantillon témoin) à 16,83 % pour l'échantillon incorporant 30 % de biochar. Sur la base des résultats obtenus, on peut conclure que le biochar possède la capacité d'améliorer les propriétés du mortier BFUP lorsqu'il est utilisé en remplacement partiel des granulats fins conventionnels dans les fractions mineures.

I.5.9.3. Effet du biochar à l'état frais :

L'évaluation des propriétés rhéologiques de ciment repose en grande partie sur le critère du slump ou de la fluidité [79]. L'étude a révélé que l'intégration du biochar dans la pâte BFUP ne montre aucun signe de ségrégation. L'une des raisons de la faiblesse de la résistance mécanique et de la durabilité est l'insuffisance de la maniabilité des composites cimentaires [80,81]. Les courbes d'écoulement pour différents mortiers BFUP sont illustrées dans la Figure I.20, mettant en évidence l'impact considérable de la quantité de biochar sur la fluidité du mortier frais. Le graphique a indiqué que le taux de substitution du biochar a un impact minimal sur la valeur de l'affaissement, surtout lorsqu'il est maintenu en dessous de 30 %. Toutefois, une transition marquante a été notée lorsque les taux de substitution ont atteint 30 % et 40 %, entraînant une réduction considérable des valeurs de consistance de 52,61 % et 86,74 %. De plus, l'impact des diverses formes de biochar sur la valeur d'affaissement était

remarquablement négligeable lorsque le dosage est resté constant, comme illustré sur la Figure I.21.

La perte de la valeur de l'affaissement pourrait éventuellement être attribuée à l'absorption progressive de l'humidité dans les pores du biochar. Le résultat trouvé par Gupta & Kua [79], indiquant que la lubrification limitée ou l'effet de roulement à billes dans les particules de biochar, en raison de leur forme irrégulière et les propriétés de rétention d'eau dues à la forte concentration de carbone dans le biochar conduisent à une perte d'ouvrabilité de mélange cimentaire [81,82].

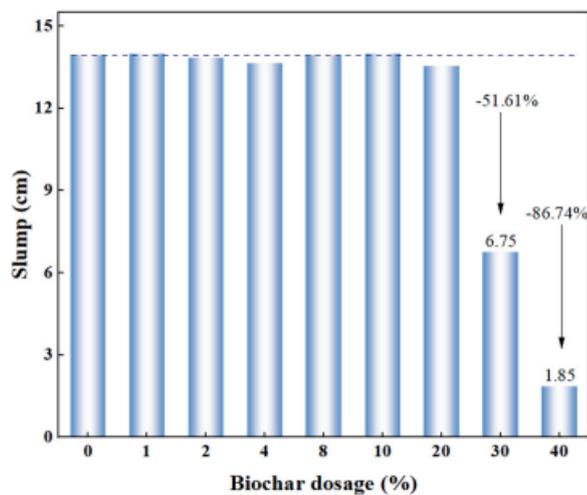


Figure I.20 : Affaissement du mortier BFUP frais en fonction de la quantité de biochar. [78]

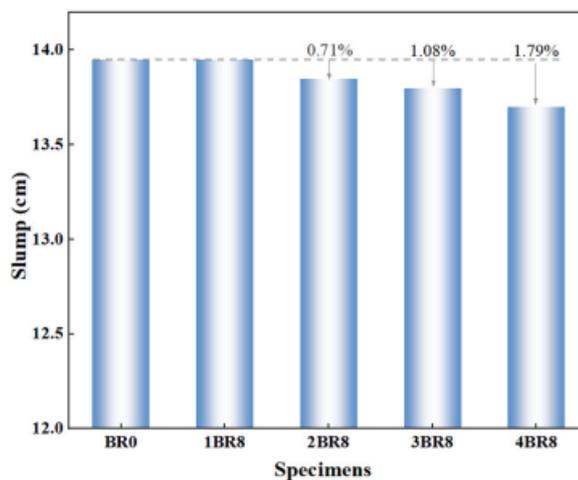


Figure I.21 : Affaissement du mortier BFUP frais avec différents types de biochar. [78]

BR0 : 0 biochar

1BR8 : biochar (les coques de palmier)

2BR8 : biochar (les coques d'abricot)

3BR8 : biochar (les coques de dattes)

4BR8 : biochar (les coques de pêche)

I.5.9.4. Effet du biochar à l'état durci :

Qiuyue Zhang [78] dit que la figure I.22 illustre les valeurs moyennes de résistance à la compression à 3 et 28 jours pour des échantillons composites comprenant diverses proportions de biochar de coquille de palmier (1BR). La résistance à la compression du mortier BFUP contenant des substituts de biochar croissants est inférieure comparée au mortier de référence standard du même âge. A 3 et 28 jours d'âge, la résistance à la compression était supérieure avec une incorporation de 1 % de biochar (1BR1) par rapport au mélange témoin. La résistance à la compression du mortier avec une proportion de 2 % de biochar (1BR2) a donné un résultat similaire à celui de l'échantillon BR0 (témoin) après 3 jours de cure humide.

Les résistances à la compression réalisés sur le mortier BFUP ont montré que des modifications significatives se produisaient lorsque le biochar était substitué à plus de 10 %. Le 1BR10 a montré une résistance à la compression Inférieure de 9,32 % et 2,32 % respectivement par rapport au mortier témoin après trois jours et vingt-huit jours d'âge.

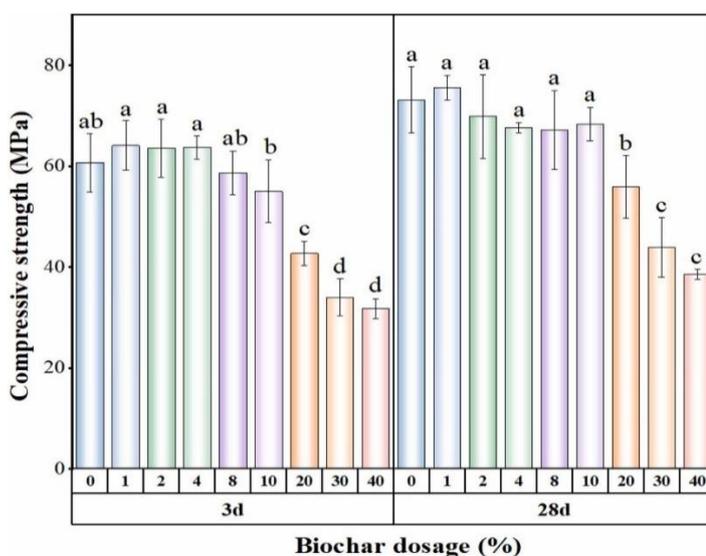


Figure I.22 : Résistance à la compression du mortier BFUP en fonction du dosage de biochar à 3 et 28 jours de durcissement. [78]

I.5.9.5. Effet du biochar sur la durabilité

Gel dégel :

Selon Tiefeng Chen et al [83] Le biochar finement broyé a un effet positif sur le mélange de ciment, améliorant sa résistance à la compression. Il améliore également la résistance au gel-dégel du béton à faible dosage de biochar. Le biochar fabriqué en utilisant l'azote et l'activation alcaline, a réussi à amplifier la surface spécifique, la capacité de rétention d'eau dans le biochar. L'introduction de biochar modifié activé augmente la chaleur d'hydratation sur une période de 24 heures de 9,38 % et optimise la structure poreuse du ciment. Globalement, le biochar améliore la résistance au gel-dégel en renforçant les caractéristiques mécaniques du béton et en servant de bulle d'air. Toutefois, l'humidité captée par le biochar crée également des interfaces délicates additionnelles et des tensions de dilatation causées par le gel. Lorsque la proportion de biochar est plus de 5 %, les échantillons perdent plus de 5 % de leur masse après seulement 125 cycles de congélation-décongélation. Donc, pour les composites biochar-ciment employés dans des zones froides et des milieux humides, il est indispensable d'examiner les propriétés du biochar et leurs impacts sur la résistance au gel et au dégel.

Retrait :

Les essais de retrait par les mélanges cimentaires BFUP à base de biochar sont restreints, bien qu'il s'agisse d'un indicateur crucial de durabilité dans le mortier de ciment. Les conclusions concernant l'effet du retrait de séchage des composites cimentaires à base de biochar étaient discordantes [84]. Akinyemi et Adesina [85] ont constaté que l'intégration de biochar issue de la sciure de bois en substitution de ciment entraînait au jeune âge (entre 1 et 4 jours) le retrait du mortier, cependant, au fur et à mesure que la phase de durcissement avançait, en observant une baisse de cette déformation. D'après la recherche effectuée par Dixit et al. [86], ils ont constaté que le retrait s'accroît avec un taux plus élevé de biochar. [78]

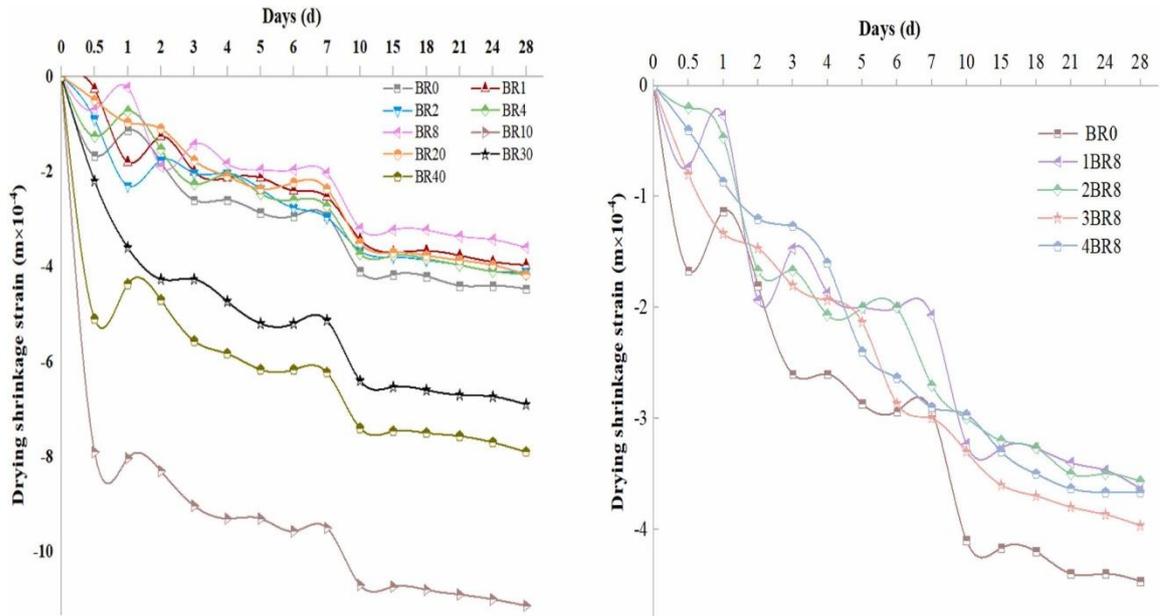


Figure I.23 : Retrait de l'UHPC mortier lors du séchage avec différents dosages (a) et types (b) de biochar. [78]

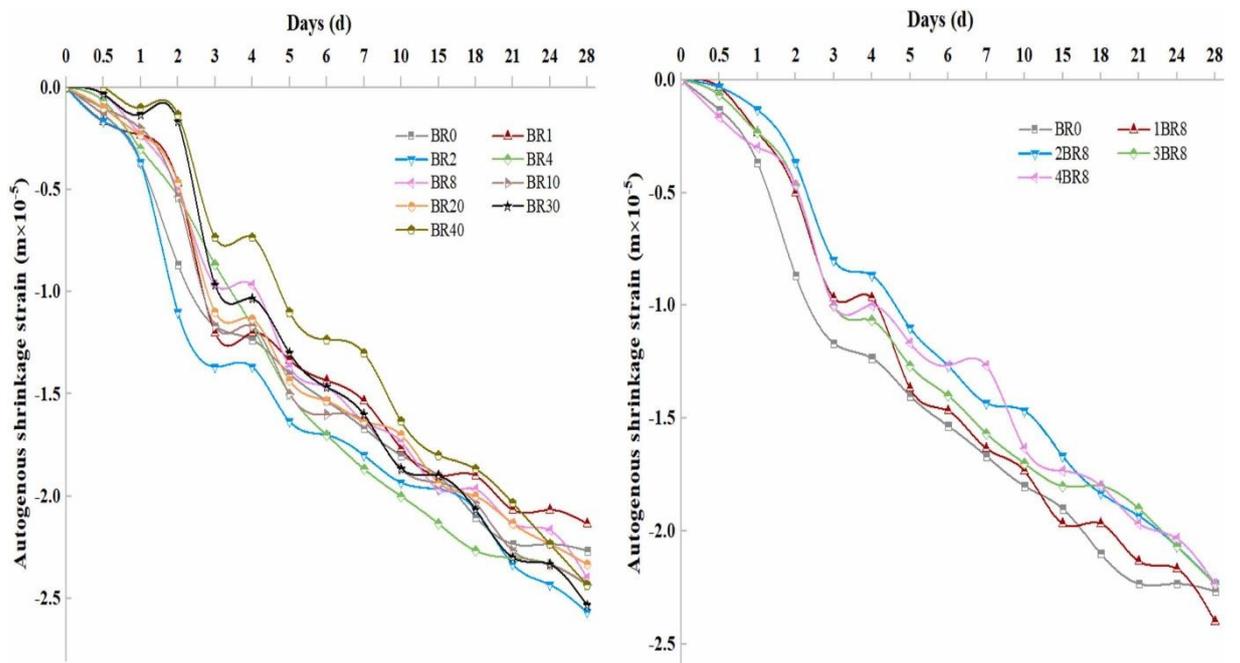


Figure I.24 : Retrait endogène du mortier BFUP à différents taux (a) et types de biochar (b). [79]

Conclusion :

D'après la revue bibliographique, on conclut que la substitution de ciment par du biochar peut améliorer certaines propriétés de béton et de mortier en fonction du taux de substitution et des conditions d'utilisation.

CHAPITE II
MATERIAUX ET PROTOCOLE
EXPERIMENTAL

II.1. Introduction :

Dans ce chapitre, nous fournissons une vue d'ensemble des matériaux employés ainsi que des tests expérimentaux effectués.

II.2. Caractéristiques des matériaux :

On présente ci-dessous les caractéristiques des matériaux employés dans la fabrication de mortiers :

II.2.1. Ciment :

Le cimentier employé est issu de la cimenterie Lafarge(**Figure II.1**). CEM I 52.5 N
Qui est constitué de :

- 95 à 100% de clinker Portland.
- Constituants secondaires (0 à 5% sulfate de calcium comme régulateur de prise).



Figure II.1 : Ciment CEM I 42,5N.

Tableau II.1 : Caractéristiques physiques du ciment.

| Classe vraie (MPa) | ρ_{Abs} (kg/m^3) | ρ_{app} (kg/m^3) | La finesse (cm^2/g) | Début de prise (h, min) | Fin de prise (h, min) |
|--------------------|---------------------------|---------------------------|-------------------------|-------------------------|-----------------------|
| 43 | 2750 | 1128.8 | 4328 | 2h 00 | 3h 00 |

Tableau II.2 : Composition chimique de ciment (%).

| TiO ₂ | CaO | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | MgO | K ₂ O | Na ₂ O | SO ₃ | SiO ₂ | Cl | Perte au feu |
|------------------|------|--------------------------------|--------------------------------|-------|------------------|-------------------|-----------------|------------------|-------|--------------|
| 0,263 | 66,2 | 4,441 | 3,207 | 3,374 | 0,868 | 0,382 | 2,746 | 17,994 | 0,192 | 2,73 |

II.2.2. Sable

Nous avons employé un mélange de deux sable naturel, comprenant le sable d'oued Souf et le sable de Baghlia.

➤ Sable d'Oued Souf :

Ce sable à la texture fine et granulaire (0/3mm) est extrait de la wilaya d'Oued Souf (**Figure II.2**). Les caractéristiques physiques sont consignées dans le (**tableau II.3**).



Figure II.2 : sable d'Oued Souf.

Tableau II.3 : Caractéristiques physiques de sable d'Oued Souf.

| $\rho_{Abs} (kg/m^3)$ | $\rho_{app} (kg/m^3)$ | Esv (%) | Esp (%) | Module de finesse |
|-----------------------|-----------------------|---------|---------|-------------------|
| 2660 | 1626,9 | 73,7 | 72,2 | 1,5 |

Tableau II.4 : Résultats d'analyse granulométrique d'Oued Souf.

| Tamis en (mm) | Vide (g) | Pleine (g) | Refus (g) | Refus cumulé | Refus cumulé en (%) |
|---------------|----------|------------|-----------|--------------|---------------------|
| 5 | 502.56 | 506.14 | 3.58 | 20 | 1 |
| 2.5 | 508.31 | 517.21 | 8.9 | 37.98 | 1.9 |
| 1.25 | 487.29 | 564.97 | 77.68 | 115.66 | 5.78 |
| 0.63 | 334.79 | 609.34 | 274.55 | 461.43 | 23.07 |
| 0.315 | 365.1 | 390.45 | 25.35 | 486.78 | 24.4 |
| 0.160 | 326.43 | 1725.28 | 1398.85 | 1885.63 | 94.28 |
| 0.08 | 317.94 | 413.61 | 95.67 | 1981.3 | 99.06 |

➤ **Sable de baghlia :**

Il s'agit d'un sable grossier roulé à la forme arrondie, de surface lisse et de granulométrie (0/5 mm) (**Figure II.3**). Le tableau II.4 présente les principales propriétés physiques de ce sable.

Tableau II.5 : Caractéristique physiques de sable de Baghlia.

| $\rho_{Abs} (kg/m^3)$ | $\rho_{app} (kg/m^3)$ | Esv (%) | Esp (%) | Module de finesse |
|-----------------------|-----------------------|---------|---------|-------------------|
| 2680 | 1574,2 | 82 | 93,3 | 2,9 |



Figure II.3 : Sable de Baghlia.

Tableau II.6 : Résultats d'analyse granulométrique du Baghlia.

| Tamis en (mm) | Vide (g) | Pleine (g) | Refus (g) | Refus cumulé | Refus cumulé en (%) |
|---------------|----------|------------|-----------|--------------|---------------------|
| 5 | 502.6 | 513.52 | 10.96 | 15.93 | 0.79 |
| 2.5 | 508.31 | 683.42 | 175.11 | 250.97 | 12.54 |
| 1.25 | 487.3 | 1241.35 | 754.06 | 1005.03 | 50.25 |
| 0.63 | 334.8 | 574.74 | 239.95 | 1393.69 | 69.68 |
| 0.315 | 365.1 | 383.37 | 18.27 | 1411.96 | 70.6 |
| 0.160 | 326.63 | 755.48 | 429.05 | 1841.01 | 92.05 |
| 0.08 | 317.14 | 431.27 | 113.33 | 1954.34 | 97.71 |

➤ **Mélange des sables :**

Les deux sables ont été mélangés pour obtenir un mélange avec un module de finesse entre 2,2 et 2,8 (**Figure II.4**).

$$Mf1 < Mf3 < Mf2$$

Pour obtenir un module de finesse $MF = 2.34$ on calcule le pourcentage des deux mélanges, On applique la règle d'Abrams pour la correction des finesses, on obtient ce qui suit :

$$S1 = \frac{MF - MF2}{MF1 - MF2} \times 100 = 60\% \dots \dots \dots \text{Eq (1)}$$

$$S2 = \frac{MF1 - MF}{MF1 - MF2} \times 100 = 40\% \dots \dots \dots \text{Eq (2)}$$

- ✓ S1 : Pourcentage du sable grossier de Baghlia : 60%
- ✓ S2 : Pourcentage du sable fin d'Oued Souf : 40%

- Le mélange :

Baghlia = 60% et Oued Souf =40%

L'analyse granulométrique réalisée sur le mélange de sables est présentée dans le tableau ci-dessous.

Tableau II.7 : Résultats d'analyse granulométrique du mélange.

| Tamis en (mm) | Vide (g) | Pleine (g) | Refus (g) | Refus cumulé | Refus cumulé en (%) |
|---------------|----------|------------|-----------|--------------|---------------------|
| 5 | 502.56 | 504.75 | 2.63 | 4.82 | 0.24 |
| 2.5 | 508.31 | 573.08 | 64.77 | 89.34 | 4.46 |
| 1.25 | 487.29 | 853.02 | 365.73 | 455.07 | 22.75 |
| 0.63 | 334.79 | 614.82 | 280.03 | 859.71 | 42.98 |
| 0.315 | 365.1 | 368.01 | 2.91 | 862.62 | 43.13 |
| 0.160 | 326.43 | 1293.65 | 967.22 | 1829.84 | 91.49 |
| 0.080 | 317.94 | 447.40 | 129.46 | 1959.3 | 97.96 |

MF =2,34



Figure II.4 : Sable corrigé.

- MF1 = 1,5 Module de finesse du sable fin d'Oued Souf
- MF2 = 2,9 Module de finesse du sable grossier de Baghlia.
- MF = 2,34 Le module de finesse souhaité.

Tableau II.8 : Caractéristiques physiques de sable corrigé.

| $\rho_{Abs} (kg/m^3)$ | $\rho_{app} (kg/m^3)$ | C abs (%) | Module de finesse |
|-----------------------|-----------------------|-----------|-------------------|
| 2600 | 1613.12 | 2.22 | 2,34 |

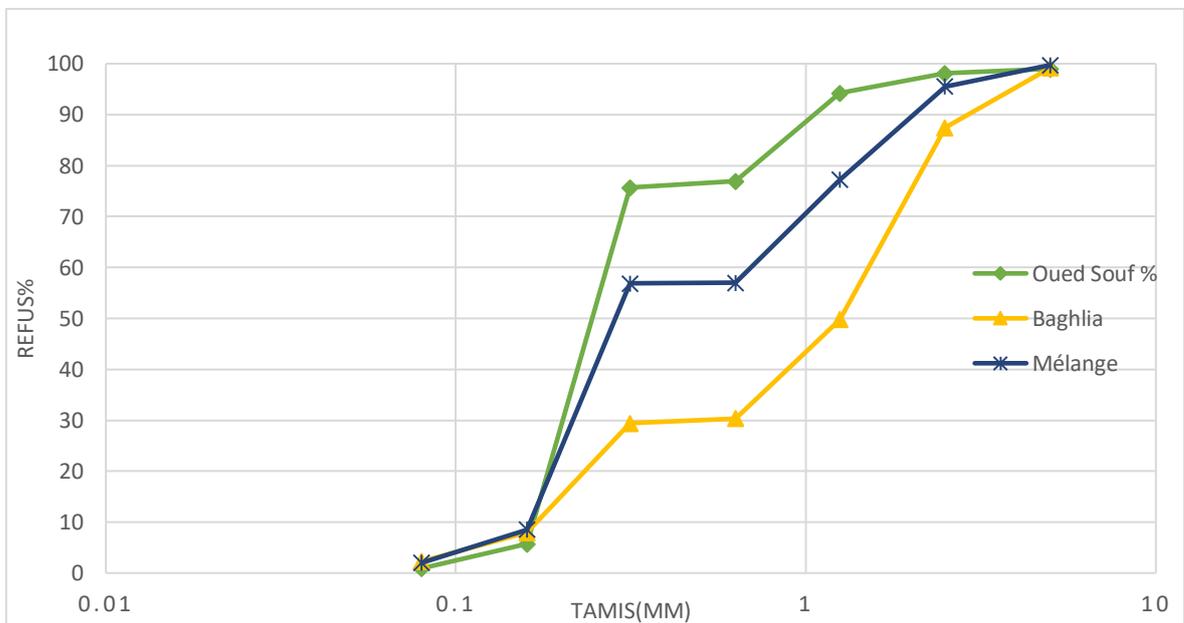


Figure II.5 : Courbe granulométrique.

II.2.3. Biochar :

Dans notre recherche expérimentale, nous avons employé du Biochar dérivé du bois forestier.



Figure II.6 : Biochar

II.2.4. Préparation de biochar :

Le biochar utilisé dans ce travail est commercial, à base de bois de forêt, avec une granulométrie assez grande.

Nous avons utilisé un micro-broyeur (**figure II.7**). Pour faire le broyage du biochar chaque 180 g et broyé pendant 4 min, On obtient une certaine finesse proche du ciment, puis on a tamisé la poudre obtenue avec un tamis de 80 mic afin d'obtenir le biochar utilisé dans la formulation de mortier.



Figure II.7 : micro-broyeur

Tableau II.9 : Caractéristiques physiques de biochar

| | ρ_{Abs} (kg/m^3) | ρ_{app} (kg/m^3) | La finesse (cm^2 /g) |
|----------------|------------------------------|------------------------------|-----------------------------|
| Biochar | 928.76 | 662.31 | 6434 |

II.2.4. L'eau de gâchage

Pour le malaxage du mortier, nous avons employé l'eau du robinet provenant du laboratoire.

II.2.5. Super-plastifiant

Le MEDAFLOW 30 est un super plastifiant hautement réducteur d'eau de troisième génération. Il est élaboré à partir de Poly-carboxylates d'Ether qui optimisent grandement les caractéristiques des bétons.

Tableau II.10 : Les caractéristiques de Super-plastifiant MEDAFLOW 30.

| Aspect | Liquide |
|------------------|-------------|
| Densité | 1.07 ± 0.01 |
| PH | 6 – 6.5 |
| Couleur | Brun clair |
| Teneur en chlore | < 0.1 g/l |
| Extrait sec | 30% |



Figure II.8 : Super-plastifiant

II.3. Les essais réalisés :**II.3.1. Consistance et prise :**

L'essai de consistance est effectué en accord avec la norme EN 196-3. On utilise l'instrument Vicat pour cette opération, qui est constitué d'un moule tronconique (avec des mesures de $h=40$ mm, $d_1=70$ mm et $d_2=80$ mm) et d'une tige glissante dotée d'une sonde de 10 mm de diamètre à son extrémité.

La sonde est placée sur la surface de l'échantillon puis lâchée sans élan, dépourvue de toute vitesse initiale. Elle s'introduit alors dans la pâte. Après avoir été immobilisé (ou passé un délai de 30 secondes), la distance (d) entre l'extrémité de la sonde et la plaque de base est déterminée. On considère que la consistance de la pâte est normale si cette distance se situe entre $6 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$.

Pour l'essai de prise, également effectué selon la norme EN 196-3, sur utiliser le même équipement dans des conditions comparables, à l'exclusion de la sonde qui a un diamètre inférieur (1,13 mm). Dès que la pâte atteint une texture standard, l'aiguille de Vicat est placée sur son dessus sans mouvement initial. Elle est plantée dans la pâte, et une fois arrêtée (ou après 30 secondes), sur mesurer la distance (d) entre l'extrémité de l'aiguille et le plateau de base.

Ce processus est itéré à des intervalles déterminés jusqu'à ce que la distance (d) arrive à $4 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$, signalant la conclusion de la capture. On la note lorsque l'aiguille de Vicat s'arrête de s'enfoncer dans la pâte et ne laisse plus aucune marque.



Figure II.9 : Vicat.

II.3.2. Formulation de MAP :

On utilise la méthode d'Okamura dans le but d'optimiser la quantité de Super-plastifiant afin d'obtenir un MAP uniforme et stable, exempt de ressuage et de ségrégation. Ce qui permettra d'avoir les caractéristiques désirées avec un remplacement du 0, 5, 10 et 15% du ciment par Biochar. Dans l'élaboration de la formule, un élément crucial considéré est le rapport Eau/Liant (E/L), qui est fixé à 0,4. Le rapport Sable/Mortier (S/M) est de 0,5.

Le dosage en Super-plastifiant est fixé à 0,7% après l'avoir optimisé par des essais d'ouvrabilités à l'état frais avec une variation de pourcentage de 0,6% à 0,9%. Afin d'obtenir un mortier autoplaçant, l'étalement au mini cône doit être compris entre 270 mm et 330 mm et le temps d'écoulement en V-Funnel entre 2 et 10 secondes.

Nous avons défini les proportions des composants du mortier, à savoir le ciment, le biochar, le sable, l'eau et le Super-plastifiant, grâce à un tableau Excel fourni dans l'annexe. Le malaxage a été effectué à l'aide d'un mélangeur de mortier d'une capacité de 5 litres (**Figure II.10**).



Figure II.10 : Malaxeur a mortier.

La séquence de malaxage est donnée dans le **Tableau II.11** suivant :

Tableau II.11 : Séquence de malaxage du MAP

| Matériaux Sec (Ciment+Biochar+Sable) | | Ajouté la quantité d'eau W1 (eau) | | Ajouté la quantité d'eau W2 (eau+SP) | |
|---|---------------|--------------------------------------|---------------|---|---------------|
| Malaxe pendant 60s | Vitesse lente | Malaxe pendant 60s | Vitesse lente | Malaxe pendant 180s | Vitesse lente |

II.3.3. Essais sur MAP à l'état frais :

II.3.3.1 Essais D'étalement au mini cône :

Cet essai consiste à évaluer l'étalement en comblant le petit cône placé sur une surface d'acier lustré. Pour obtenir cette mesure, on soulève le moule et on permet au mortier de couler jusqu'à ce qu'il s'arrête et forme une galette. Pour un mortier autoplaçant approprié, le diamètre doit se situer entre 270 mm et 330 mm. Selon la **Figure II.11**, le diamètre moyen de la galette (D Moyen) doit être déterminé en suivant les deux orientations indiquées par la formule ci-après :

$$D = \frac{D1 + D2}{2}$$



Figure II.11 : Etallement au mini cône.

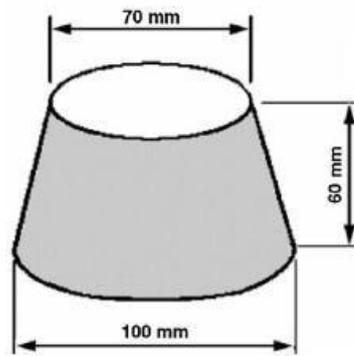


Figure II.12 : Les démentions du mini cône.

II.3.3.2 Essais de V-Funnel :

Le test de l'entonnoir en V (V-Funnel) consiste à remplir un litre de mortier dans l'entonnoir et à chronométrer le temps entre l'ouverture de l'orifice de l'entonnoir et l'apparition de la première goutte visible en regardant directement vers le bas. Pour un mortier autoplaçant, le temps d'écoulement doit se situer entre 2 et 10 secondes. Le schéma II.13 illustre le mécanisme du test en forme d'entonnoir en V.



Figure II.13 : L'essai de V-Funnel.

II.3.3.3 Moulage et conservation des éprouvettes :

Pour tous les tests sur mortier durci, les éprouvettes sont fabriquées avec des moules prismatiques de 4x4x16 cm³, comme le montre la **Figure II.14**.



Figure II.14 : Moule prismatique pour mortier.

Suite à la préparation des mortiers, deux couches seront appliquées dans des moules métalliques préalablement huilés afin d'assurer l'uniformité du mélange. Les éprouvettes doivent être recouvertes d'un film plastique et conservées dans les conditions ambiantes du laboratoire. Au bout de 24 heures, les échantillons doivent être démoulés et placés dans des récipients contenant de l'eau saturée en chaux à une température de $20\text{ °C} \pm 1\text{ °C}$ afin d'assurer une cure standardisée jusqu'à la date du test.



Figure II.15 : Conservation des éprouvettes

II.3.4. Essais sur MAP à l'état durci :

Les éprouvettes sont maintenues dans l'eau jusqu'à ce que celle-ci atteigne la date des essais. Les tests sont réalisés à 7, 28 et 45 jours d'âge en calculant la moyenne des résultats obtenus pour chaque mélange et pour chaque essai.

II.3.4.1. Résistance à la flexion :

L'évaluation de la résistance à la flexion R_f se fait sur des échantillons prismatiques de 4x4x16 cm³. Les tests sont réalisés conformément à la norme NF EN 196-1. Les résultats obtenus correspondent à la moyenne des valeurs de trois échantillons. La formule suivante est utilisée pour le calcul de la contrainte :

$$R_f = \frac{1,5 P L}{b^3}$$

P : la force appliquée sur l'éprouvette (N).

L : la distance entre appuis (100mm).

b : la largeur de l'éprouvette (40mm).



Figure II.16 : Essai de résistance à la traction par flexion.

II.3.4.2. Résistance à la compression :

La résistance à la compression des mortiers est mesurée sur les demi-prismes obtenus suite à la rupture en flexion de trois échantillons de $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$, selon une méthode à trois points. Comme le montre la figure II.17, les demi-prismes sont positionnés entre les deux surfaces de l'appareil et soumis à une compression sur les côtés latéraux du moulage. Les tests sont réalisés en accord avec la norme NF EN 196-1. Le calcul de la contrainte de rupture se fait en utilisant la formule suivante :

$$R_c = \frac{F_c}{b^2}$$

Avec :

F_c : la force appliqué sur la demi prisme (N).

b : la largeur de l'éprouvette (40 mm).

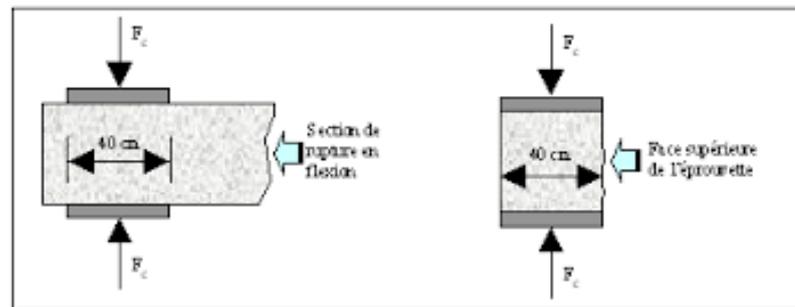


Figure II.17 : Essai de résistance à la compression.

II.3.5. Essais sur les indicateurs de durabilité :

II.3.5.1. Absorption capillaire :

Selon la norme ASTM C1585-11, les échantillons (4x4x16) sont soumis à un test d'absorption capillaire. Le résultat reflète la moyenne des valeurs calculées pour chaque composition des deux échantillons examinés. Après une période de 28 jours de cure humide, l'échantillon est soumis à un séchage jusqu'au poids constant dans une étuve ventilée à une température contrôlée de $80 \pm 2^\circ\text{C}$.

Après séchage, on étend la résine sur le contour de l'éprouvette (**Figure II.18**). On les positionne dans un réservoir d'eau à niveau constant (2 à 3 mm) sur un support dont la hauteur est inférieure à 1 cm.

Les échantillons sont soumis à une absorption d'eau unidirectionnelle (**Figure II.19**) pendant une durée déterminée. On effectue des mesures de l'absorption après 1 minute, 2 minutes, 5 minutes, 10 minutes, 20 minutes, 30 minutes, 1 heure, 2 heures, 3 heures, 4 heures, 5 heures, 6 heures et jusqu'à 1 jour complet, 2 jours, 3 jours, 6 jours, 7 jours et 8 jours. Après avoir essuyé chaque échantillon avec un tissu humide, son poids est mesuré.

Le coefficient d'absorption capillaire est déterminé par la formule suivante selon la Norme **ASTM C1585- 11**.

$$I = \frac{mt}{a \times d}$$

I : coefficient d'absorption capillaire exprimé en (mm).

mt : la différence de masse de l'éprouvette à une échéance donnée (g).

d : la masse volumique de l'eau exprimée en (g/mm³).

A : section de l'éprouvette en (mm²).

➤ Le coefficient de sportivité est calculé par la formule suivante :

$$S = \frac{Q/A}{\sqrt{t}}$$

A : surface du spécimen en contact avec l'eau en cm².

Q : le volume d'eau absorbé en cm³.

t : temps écoulé en (s).

S : coefficient de sportivité du spécimen en cm/√s.

On trace Q/A en fonction de √t, puis on trace la régression linéaire entre Q/A et √t, puis on calcule les deux pentes des deux lignes droites qui fournissent le coefficient de sportivité (s) des grands et des petits pores.



Figure II.18 : Application de la résine sur la face inférieure de l'éprouvette.



Figure II.19 : Absorption capillaire

II.3.5.2. Porosité accessible à l'eau

On détermine la porosité accessible à l'eau conformément à la norme NF P-18-459. Selon la définition, ce test correspond à la fraction du volume vide (V_v) disponible pour l'eau par rapport au volume total (V_t). L'évaluation de la porosité ouverte et de la masse volumique apparente d'un échantillon de mortier est réalisée par la méthode de saturation sous vide après son immersion dans l'eau.

L'expérience implique de sécher les échantillons à une température d'environ $80\text{ }^\circ\text{C}$, $\pm 2\text{ }^\circ\text{C}$, jusqu'à ce qu'ils atteignent un poids stable. Nous déterminons la masse sèche de l'échantillon (M_{sec}) en utilisant une balance de précision capable de mesurer jusqu'à $0,1\text{ g}$. Par la suite, nous introduisons les échantillons dans une enceinte hermétique et activons la pompe à vide pour maintenir une pression stable.

Au bout de 3 heures, nous commençons à introduire de l'eau dégazée progressivement jusqu'à ce que les échantillons soient immergés d'environ 2 cm d'eau. Après avoir arrêté la pompe à vide pendant 4 heures, nous conservons les éprouvettes en état de saturation pendant environ 18 heures, avec une tolérance de ± 2 heures (**Figure II.20**). Les éprouvettes sont par la suite extraites du dessiccateur et pesées dans l'eau à l'aide d'une balance hydrostatique (M_{eau}). On utilise une éponge pour absorber l'eau présente à la surface des éprouvettes, puis

on les impacts de nouveau à l'air libre afin d'effectuer l'évaluation (Mair). Le pourcentage de porosité accessible à l'eau ϵ est illustré et calculé à l'aide de la formule suivante :

$$\epsilon \% = \frac{M_{air} - M_{sec}}{M_{air} - M_{eau}} \times 100$$

Avec :

ϵ : Porosité accessible à l'eau en (%).

M eau : la masse du spécimen immergé dans l'eau.

M air : la masse du spécimen pesé dans l'air.

M sec : la masse du spécimen sec.

• L'expression suivante définit la masse volumique apparente :

$$\rho = \frac{M_{sec}}{M_{air} - M_{eau}} \times \rho_{eau}$$

Avec :

ρ : la masse volumique apparente en (g/cm³).

ρ_{eau} : la masse volumique de l'eau (1g/cm³).



Figure II.20 : L'essai de porosité accessible à l'eau.

II.4. Organigrammes des essais

Les diagrammes ci-dessous illustrent les schémas de l'intégralité du protocole expérimental de cette mémoire.

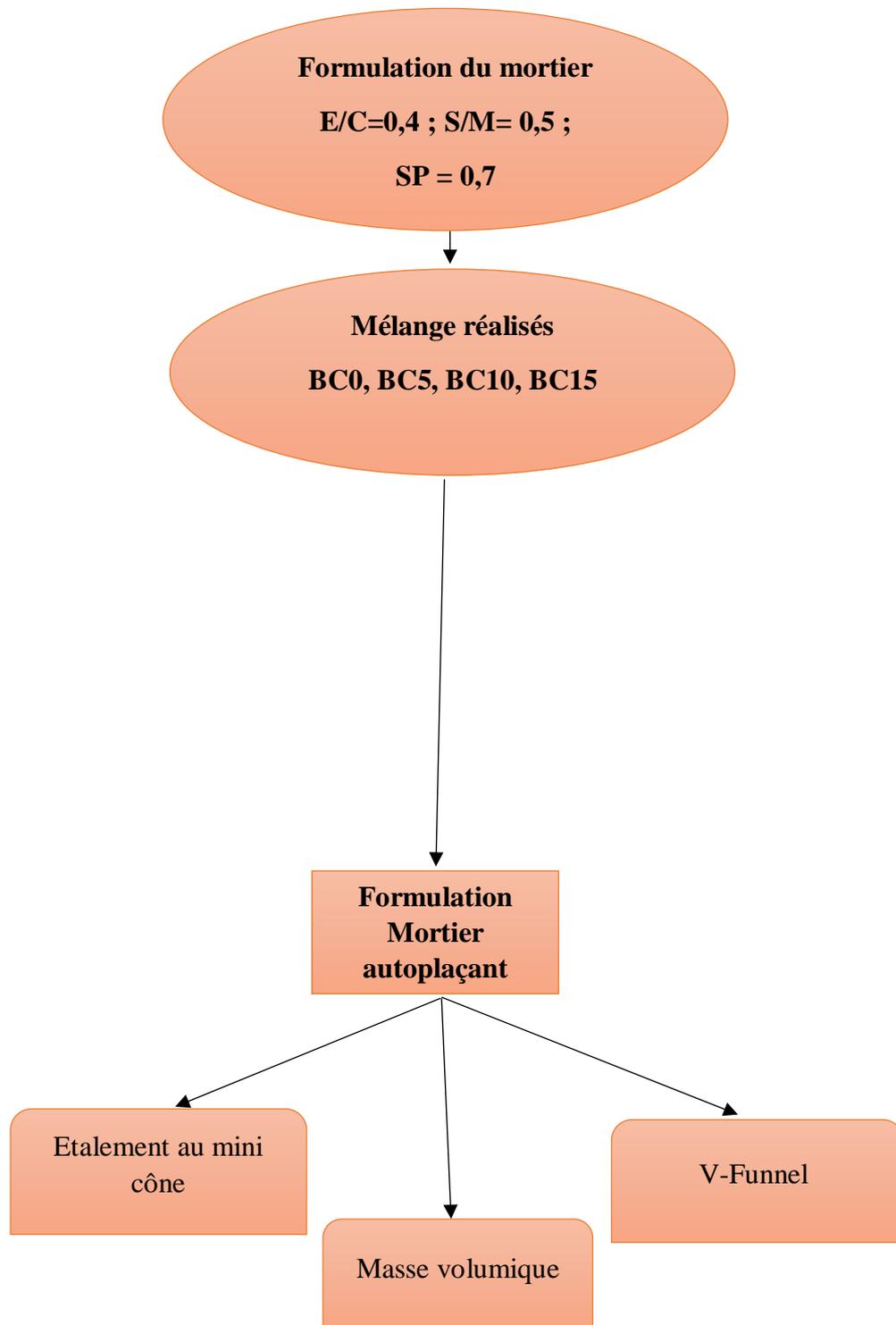


Figure II.20 : Procédé de formulation d'un MAP.

BC : biochar.

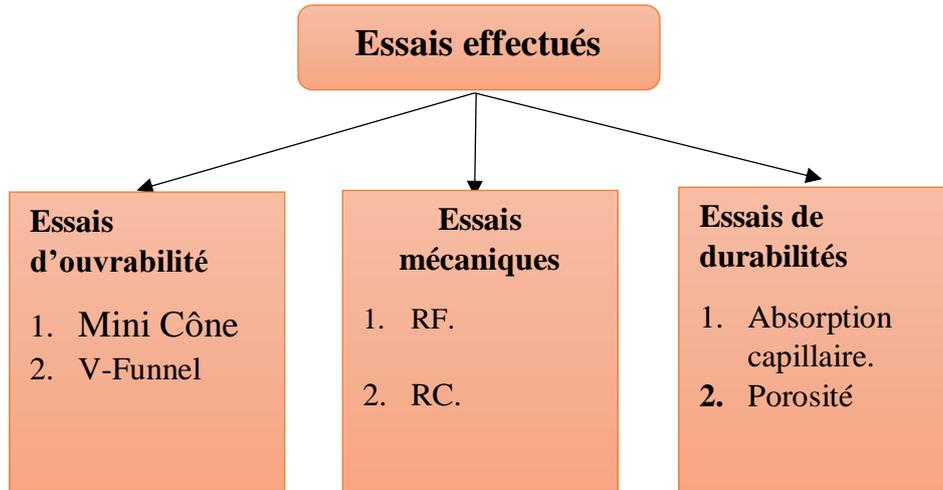


Figure II.21 : Organigramme des essais réalisés.

RF : Résistance à la Flexion

RC : Résistance à la Compression

II.5. Conclusion :

Dans notre activité, nous faisons appel à des ressources accessibles locales sur le marché algérien. Nous visons à produire une MAP économique et écoresponsable. Afin d'atteindre ce but, le ciment a été substitué par du biochar (bois) et l'impact de l'intégration de biochar sur le MAP à l'état frais a été analysé. Concernant la formulation, des tests initiaux ont été réalisés pour définir L'étude du dosage en superplastifiant et de l'effet du biochar sur la rhéologie des MAP a été réalisée par le biais des tests d'étalement et d'écoulement. Des tests sont ensuite effectués afin d'examiner l'impact du biochar sur les caractéristiques physico-mécaniques et la pérennité du MAP.

CHAPITRE III
RESULTATS ET DISCUSSION

III.1. Introduction :

Dans ce segment, exposent les divers résultats des tests réalisés sur l'impact du biochar sur le comportement des mortiers autoplaçant.

III.2. Optimisation du dosage en superplastifiant :

Les superplastifiants (SP) optimisent les caractéristiques rhéologiques du mortier. Afin d'optimiser leur dosage, on examine la fluidité et la stabilité du mortier de référence sans biochar en comparant les différents dosages.

L'impact du superplastifiant et de la température ambiante sur le mortier a exigé de multiples tentatives expérimentales avant d'établir le dosage idéal. On présente les résultats des tests d'étalement et v-Funnel sur mortier autoplaçant dans (**Tableau III.1**) et (**Figure III.1**).

Tableau III.1 : Valeurs d'étalement et v-Funnel en fonction du dosage en SP.

| Dosage en SP (%) | 0.7 | 0.8 | 0.9 |
|--|-----|-----|------|
| Etalement (mm) | 315 | 345 | 370 |
| Le Temps D'écoulement (S) | 10 | 8 | 4.95 |

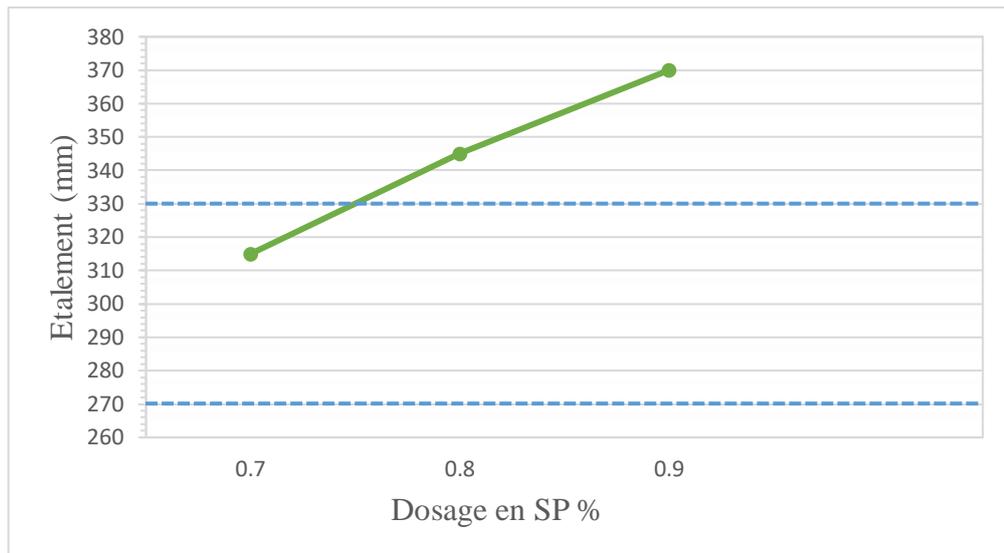


Figure III.1 : Etalement du MAP en fonction du dosage en SP.

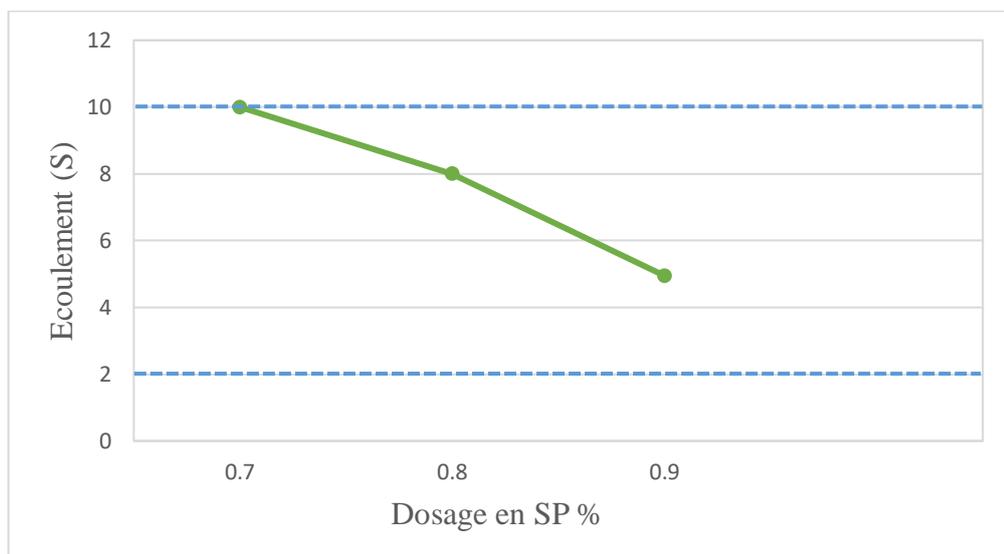


Figure III.2 : Le Temps écoulement du MAP en fonction du dosage en SP.

A chaque fois qu'on augmente le SP l'étalement augmente et le temps écoulement diminue.

Les résultats ont montré qu'un dosage de 0.7% produit un MAP avec un étalement de 315 mm qui est dans l'intervalle (270 et 330 mm).

Par rapport au temps d'écoulement, dosage de 0.7% produit un temps de 10s qui est compris entre (2 et 10 s).

III.3. Influence de biochar à l'état frais :

Suite à l'établissement de la quantité idéale de SP pour le MAP, la recherche se focalise sur l'impact du biochar sur l'ouvrabilité. La formulation des MAP utilisée comporte les paramètres suivants : S/M=0,5, E/C=0,4 et SP=0.7%. Quatre mélanges ont été préparés en remplaçant une portion du ciment par un taux équivalent de biochar, à savoir : 0% (BC0), 5% (BC5), 10% (BC10), 15% (BC15). La composition des divers MAP est exposée dans (Tableau III.2).

Tableau III.2 : Composition des différents MAP par un Volume de 1,2 litres.

| Constituants | BC 0 | BC 5 | BC 10 | BC 15 |
|--------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Ciment (g) | 773,61 | 734,93 | 696,25 | 657,57 |
| Biochar (g) | 0 | 38,68 | 77,36 | 116,04 |
| Sable (g) | 1596 | 1596 | 1596 | 1596 |
| Eau1(g) | 247,70 | 247,70 | 247,70 | 247,70 |
| Eau2+SP (g) | 106,16+5,41 | 106,16+5,41 | 106,16+5,41 | 106,16+5,41 |

Le (Tableau III.3) regroupe les résultats obtenus de l'essai d'étalement et le Temps d'écoulement. La (Figure III.3) représente la variation de l'étalement des différents MAP en fonction de taux de remplacement de ciment par le biochar. La (Figure III.4) représente le temps d'écoulement.

Tableau III.3 : Valeur de l'étalement et le Temps d'écoulement des différents MAP.

| Mortier | BC 0 | BC 5 | BC 10 | BC 15 |
|------------------------|------|------|-------|-------|
| Etalement (mm) | 315 | 330 | 330 | 330 |
| Temps d'écoulement (S) | 10 | 7,2 | 9,2 | 10 |

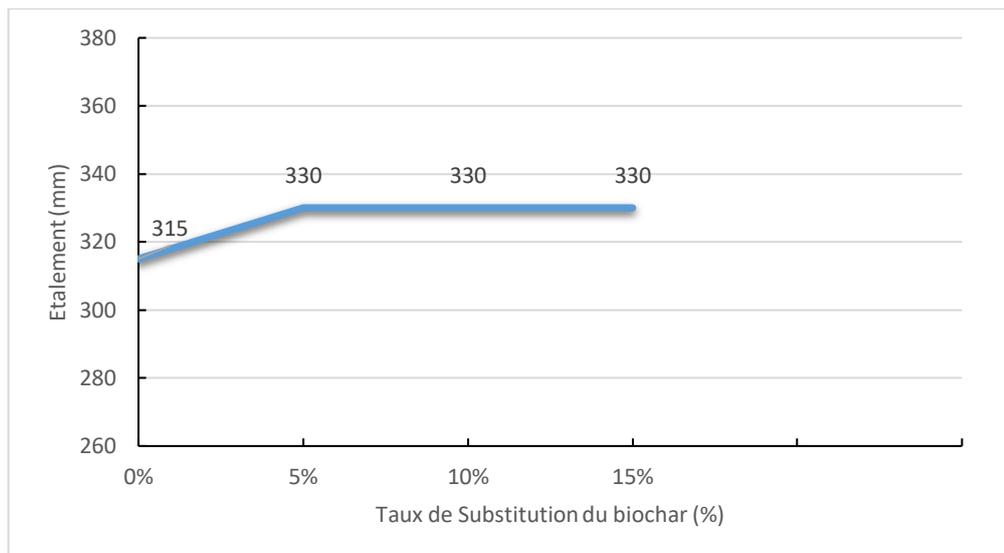


Figure III.3 : Etalement en fonction du taux de substitution de biochar.

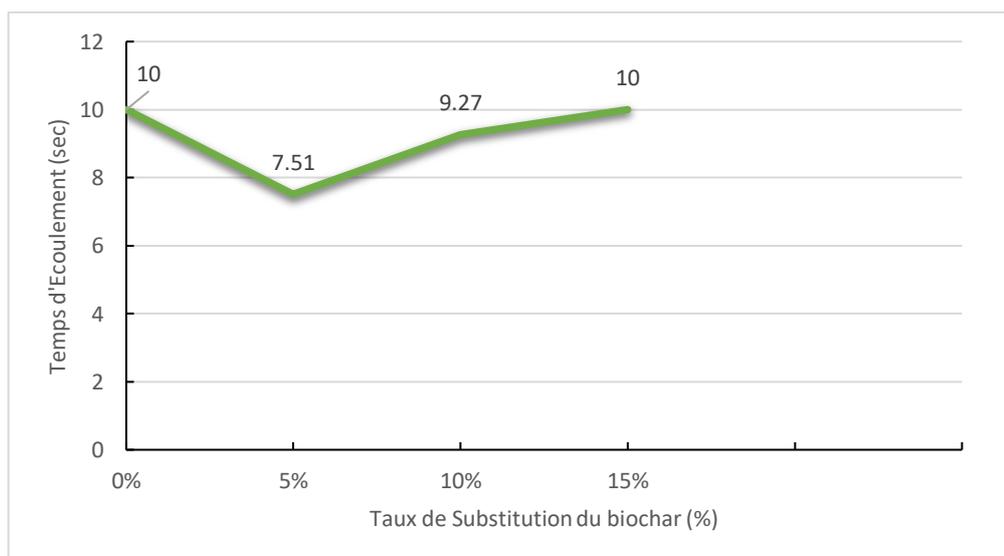


Figure III.4 : Temps d'écoulement en fonction du taux de substitution de biochar.

On observe que les diamètres d'étalement du MAP augmente chaque fois qu'on augmente le taux de substitution du ciment par le biochar. L'étalement des MAP BC 5, BC 10, BC15 est augmenté de 15mm par rapport à BC 0, représentant une amélioration d'environ 5%. Cette augmentation est liée à la structure externe des fines de biochar issu de bois.

Par rapport au temps d'écoulement on observe une diminution de 2.49s entre BC0 et BC5 après on a vu chaque fois qu'on augmente le pourcentage du biochar le temps d'écoulement s'amplifie. Comme la cendre volante le bio charbon améliore l'ouvrabilité grâce à sa forme

sphérique (effet bille à billes). Ont conclu que le biochar issu de la pyrolyse du bois améliore l'ouvrabilité du mortier autoplaçant.

III.4. Influence de biochar à l'état durci :

III.4.1 La masse volumique :

Les données des tests de densité effectués après 28 jours de cure humide sont compilées dans le (Tableau III.4) ainsi que dans les (Figures III.5).

Tableau III. 4 : Regroupement des résultats de masse volumique à 28 jours de cure humide.

| | M SEC | M EAU | M AIR | ρ (g/cm ³) |
|--------------|--------|--------|--------|-----------------------------|
| BC 0 | 252.94 | 151.06 | 276.56 | 2.01 |
| BC 5 | 267.12 | 160.23 | 291.24 | 2.04 |
| BC 10 | 262.86 | 158.06 | 288.8 | 2.01 |
| BC 15 | 253.87 | 153.00 | 279.8 | 2 |

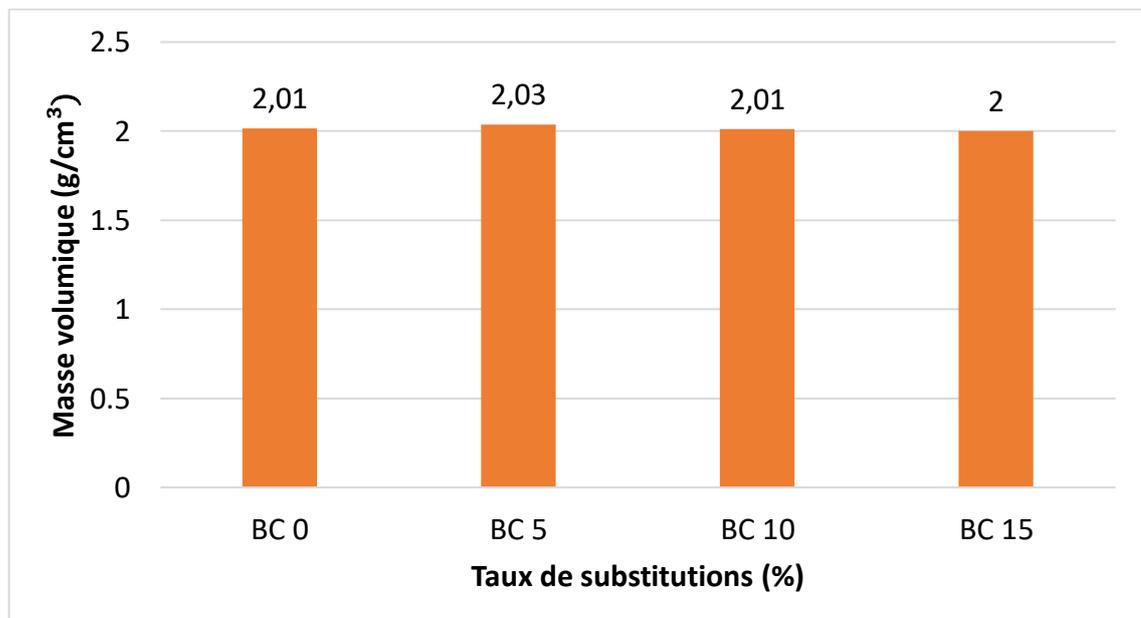


Figure III.5 : Evolution de la masse volumique des différents mortiers après 28 jours de cure humide.

Tandis que la masse volumique augmente entre BC 0 et BC 5 de 0,023 g/cm³ ensuite on remarque une légère diminution de 0.027 g/cm³ a BC10 et 0.036 g/cm³ à BC15.

III.4.2. Résistance à la compression :

Les résultats relatifs à la résistance à la compression pour divers MAP contenant du biochar, selon le taux de remplacement du ciment par le BC et en fonction de leur ancienneté, sont illustrés dans le (Tableau III.5) et la (Figure III.6).

Tableau III.5 : Résistance à la compression des MAP.

| âge | Résistance (Mpa) | | | |
|----------|------------------|------|-------|-------|
| | BC 0 | BC 5 | BC 10 | BC 15 |
| 7 jours | 34,2 | 46 | 44,3 | 41,9 |
| 28 jours | 61,7 | 55,9 | 52,8 | 44,8 |
| 45 jours | 65,8 | 62 | 55,4 | 46,6 |

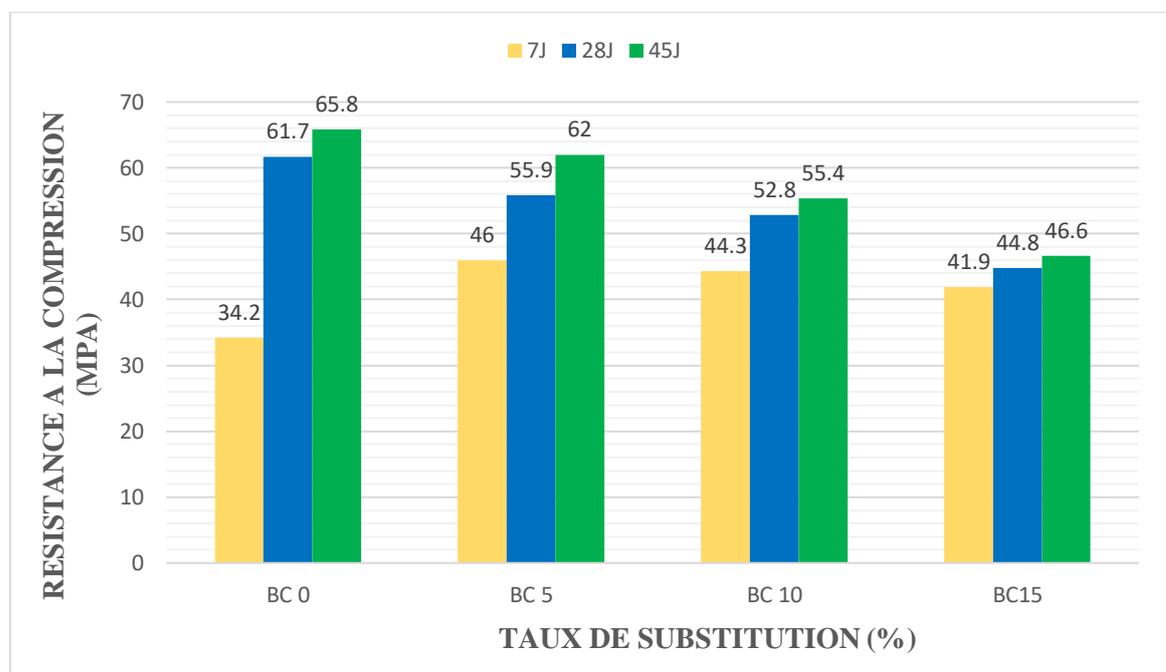


Figure III.6 : Evolution de la résistance à la compression à 7, 28 et 45 jours.

D'après les résultats on remarque que la résistance à court terme augmente par rapport au mortier de référence et on remarque aussi qu'à court terme le BC 5 a une meilleure résistance.

Tandis que la résistance à long terme diminue comparé au BC 0, cependant le BC a base de bois influe négativement sur la résistance à long terme.

Après 7 jours de cure humide, on observe une augmentation de la résistance des mélanges BC 5, BC 10, BC 15 de (34% ,29%,22%) respectivement par rapport à BC 0.

Après 28 jours RC de « BC 5, BC 10, BC 15 » diminue de (9%,14%,27%) respectivement par rapport à BC 0.

Après 45 jours RC de « BC 5, BC 10, BC15 » chute de (5%,15%,29%) respectivement par rapport au mortier témoin.

Ces résultats montrent que le biochar utilisé agit comme un précipiter de C S H a court terme. Ce qui provoque un ciment de résistance élevé a court terme.

III.4.3. Résistance à la flexion :

Le (Tableau III.6) et la (Figure III.7) illustrent les valeurs de la résistance à la flexion des divers MAP en regard du taux de remplacement du ciment par le biochar.

Tableau III.6 : Résistance à la flexion des MAP.

| âge | Résistance (Mpa) | | | |
|-----------------|------------------|------|-------|-------|
| | BC 0 | BC 5 | BC 10 | BC 15 |
| 7 jours | 1,4 | 1,48 | 1,59 | 1,61 |
| 28 jours | 1,55 | 1,61 | 1,55 | 1,72 |
| 45 jours | 1,67 | 1,65 | 1,62 | 1,8 |

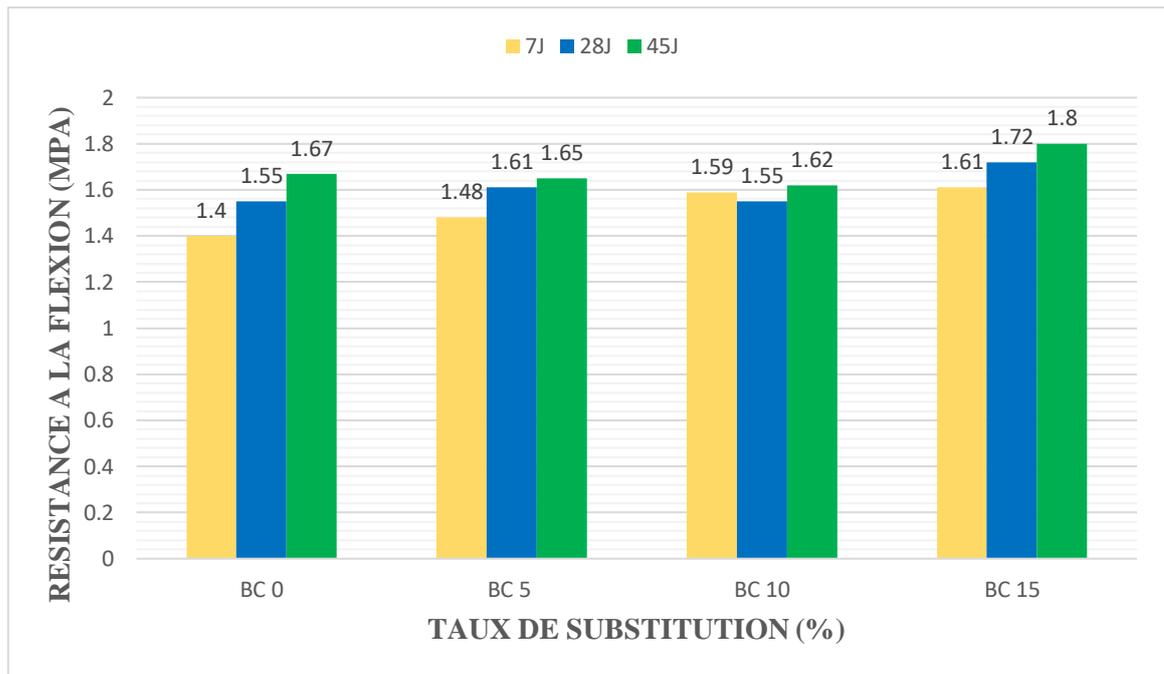


Figure III.7 : Evolution de la résistance à la flexion à 7, 28 et 45 jours

Dans ces résultats nous remarquons une légère augmentation de la résistance à la flexion à 7 jours de (5%,13%,15%) par rapport au mortier témoin des trois mélanges.

Après 28 jours il y a une augmentation de 3% pour le BC 5. Le BC 10 donne un résultat équivalent au mortier témoin. Une augmentation de 10% pour le BC 15 enregistrée par rapport au mortier témoin.

Après 45 jours d'hydratation eu une légère diminution de (1%,3%) des mélanges BC 5 et BC 10 respectivement, ensuite on constate une augmentation de 7% pour le BC 15.

On conclut que BC 15 a une meilleure résistance à la flexion vis-à-vis aux autres mélanges à court et long terme.

III.5. Influence de biochar sur les indices de durabilité :

III.5.1 Porosité accessible à l'eau :

Les données des tests de densité et de porosité accessible à l'eau effectués après 28 jours de cure humide sont compilées dans le (Tableau III.7) ainsi que dans les (Figures III.8).

Tableau III. 7 : Regroupement des résultats de porosité accessible à l'eau à 28 jours de cure humide.

| | M SEC | M EAU | M AIR | ϕ (%) |
|--------------|--------------|--------------|--------------|------------------------------|
| BC 0 | 252.94 | 151.06 | 276.56 | 18.82 |
| BC 5 | 267.12 | 160.23 | 291.24 | 18.41 |
| BC 10 | 262.86 | 158.06 | 288.76 | 19.82 |
| BC 15 | 253.87 | 153 | 279.78 | 20.44 |

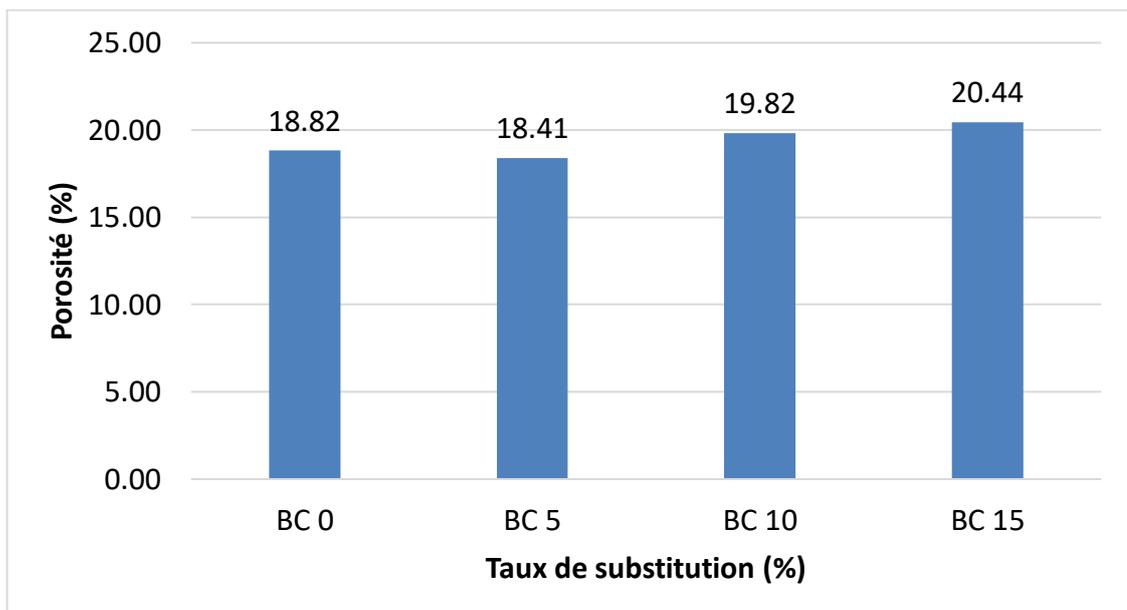


Figure III.8 : Evolution de la porosité accessible à l'eau des différents MAP après 28 jours de cure humide.

D'après les résultats on observe que la porosité après 28 jours de cure humide diminue légèrement pour le BC 5, par contre une augmentation de la porosité est observée pour les BC 10 et BC 15.

III.5.2. Absorption capillaire :

Les résultats d'absorption capillaire des divers MAP réalisé après une cure humide de 28 jours sont illustrés dans le (Tableau III.8) et la (Figure III.9).

Tableau III. 8 : Les valeurs moyennes d'absorption d'eau des différents mortiers après 28 jours de cure humide.

| Temps (s^{1/2}) | temps (min) | BC 0 | BC 5 | BC 10 | BC 15 |
|------------------------------------|------------------------|-------------|-------------|--------------|--------------|
| 7,74 | 1 | 0,053 | 0,059 | 0,043 | 0,028 |
| 10,95 | 2 | 0,075 | 0,081 | 0,081 | 0,068 |
| 17,32 | 5 | 0,134 | 0,221 | 0,115 | 0,112 |
| 24,49 | 10 | 0,153 | 0,281 | 0,193 | 0,156 |
| 34,64 | 20 | 0,296 | 0,396 | 0,35 | 0,265 |
| 42,42 | 30 | 0,503 | 0,484 | 0,378 | 0,296 |
| 60 | 60 | 0,612 | 0,737 | 0,756 | 0,587 |
| 84,85 | 120 | 0,721 | 0,915 | 0,915 | 0,671 |
| 103,92 | 180 | 0,837 | 0,971 | 1,006 | 0,853 |
| 120 | 240 | 0,872 | 1,028 | 1,068 | 0,856 |
| 134,16 | 300 | 0,928 | 1,062 | 1,143 | 0,993 |
| 146,96 | 360 | 0,987 | 1,121 | 1,456 | 1,146 |
| 293,93 | 1440 | 1,065 | 1,437 | 2,068 | 1,381 |
| 415,69 | 2880 | 1,296 | 1,625 | 2,543 | 1,696 |
| 509,11 | 4320 | 1,512 | 1,9 | 3,078 | 1,943 |
| 777,68 | 10080 | 2,065 | 2,359 | 3,812 | 2,453 |
| 831,38 | 11520 | 2,218 | 2,653 | 4,337 | 2,815 |

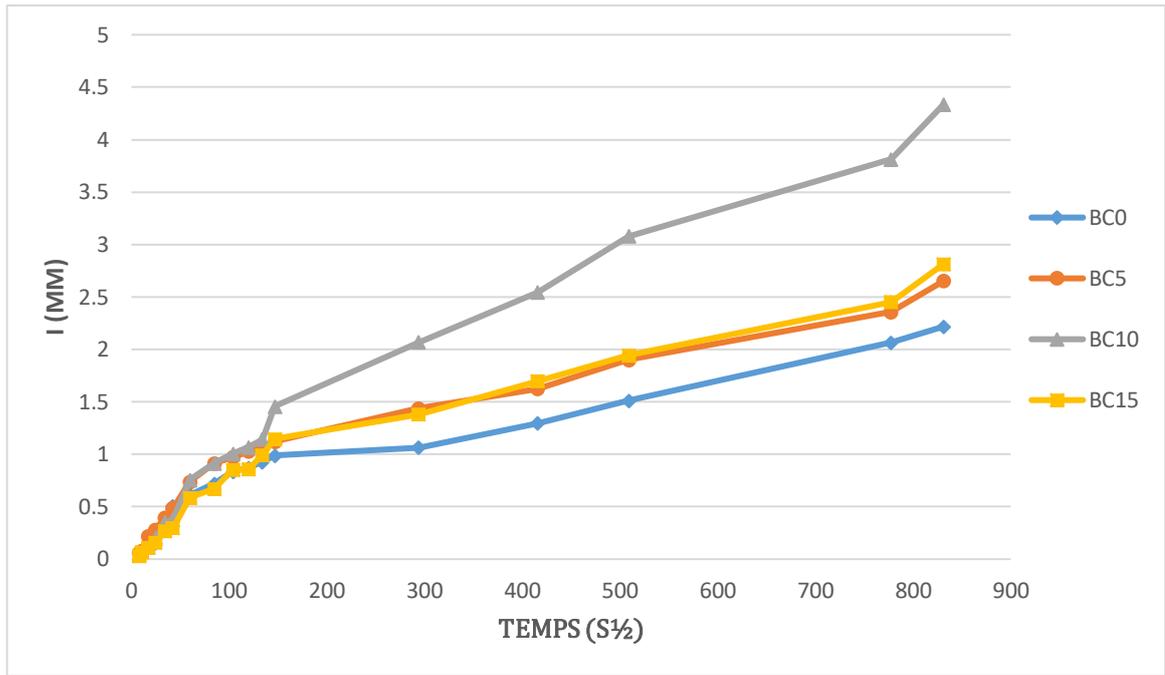


Figure III.9 : Absorption d'eau par capillarité des mortiers après 28 jours de cure humide.

D'après ces résultats on remarque que l'absorption capillaire après 28 jours de cure humide augmente par rapport au taux de substitution du ciment par le biochar. On constate que le BC 10 enregistre le taux d'absorption le plus élevé. Donc d'après les résultats on constate que le biochar surtout le BC 10 provoque une capacité d'absorption élevée par rapport au MAP sans ajouts.

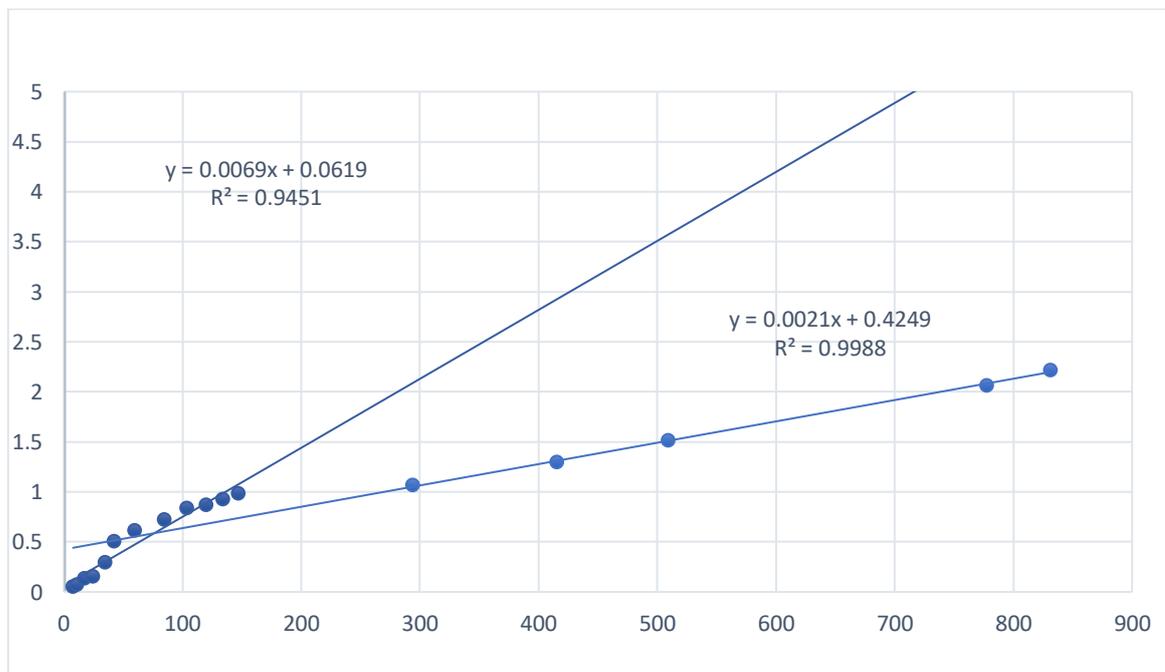


Figure III.10 : Sorptivité du BC 0 après 28 jours de cure humide.

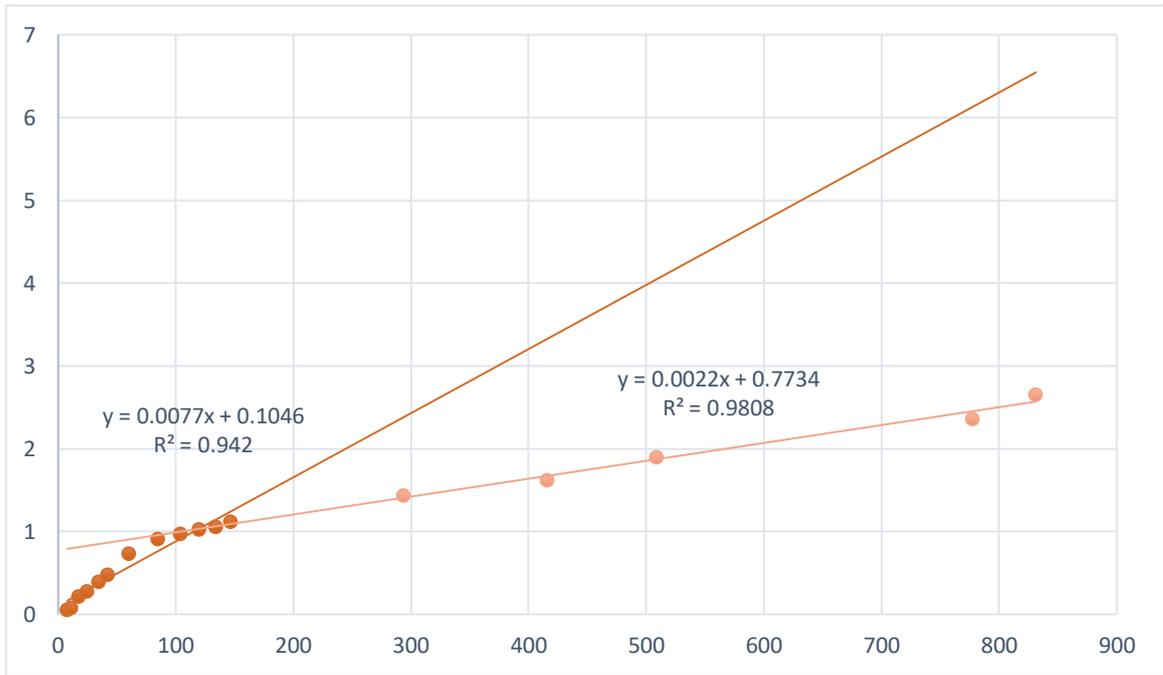


Figure III.11 : Sorptivité du BC 5 après 28 jours de cure humide.

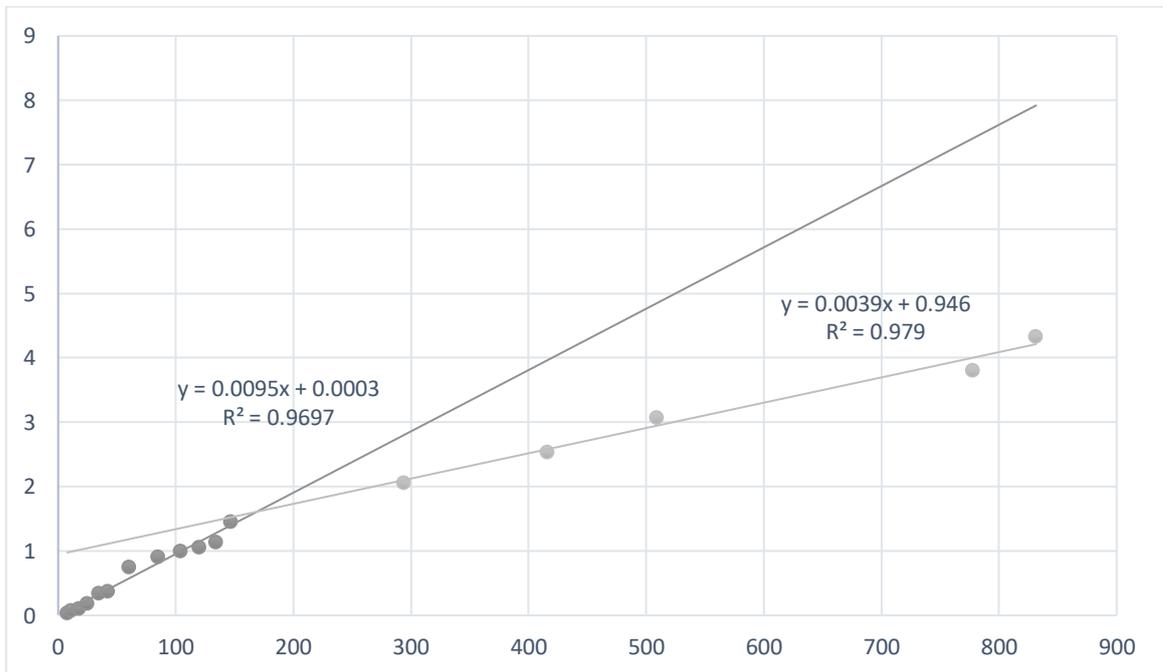


Figure III.12 : Sorptivité du BC 10 après 28 jours de cure humide.

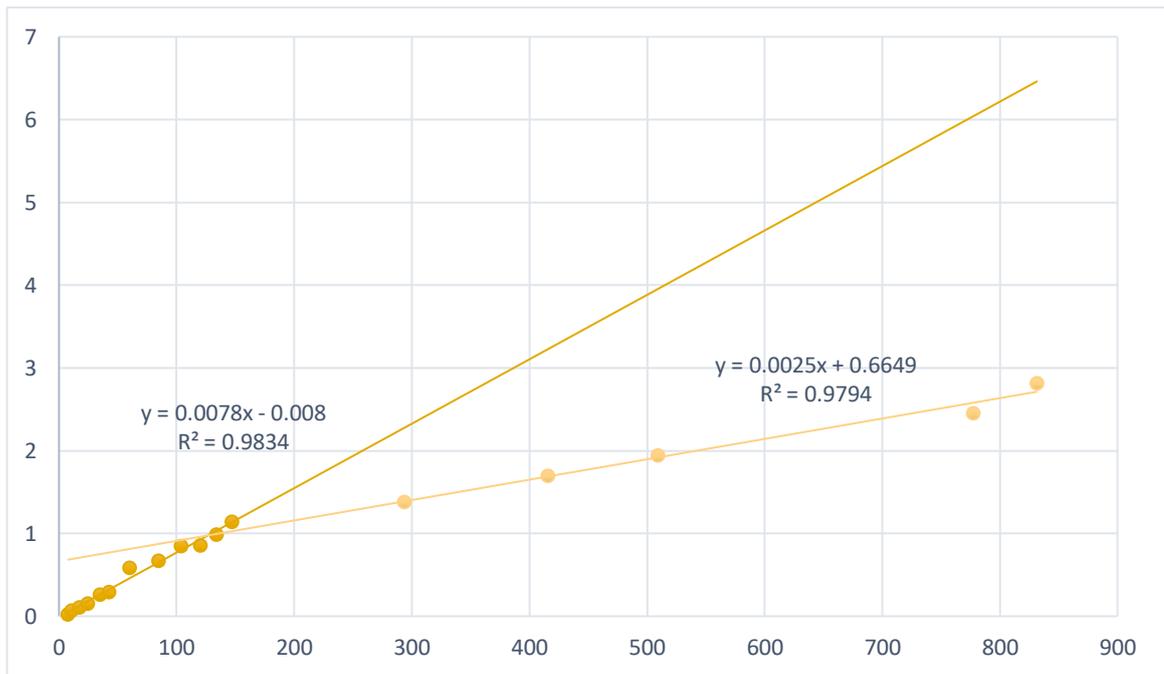


Figure III.13 : Sorptivité du BC 15 après 28 jours de cure humide.

Les résultats de Sorptivité après 28 jours de cure humide des différents MAP sont présentés dans le (Tableau III.9), et (Figure III.14).

Tableau III.9 : Sorptivité des MAP après 28 jours de cure humide.

| | BC 0 | BC 5 | BC 10 | BC 15 |
|--|-------------|-------------|--------------|--------------|
| Sorptivité ($S^{1/2}$) $0 \leq t \leq 6h$ | 0,0069 | 0,0077 | 0,0095 | 0,0078 |
| Sorptivité ($S^{1/2}$) $t > 6h$ | 0,0021 | 0,0022 | 0,0039 | 0,0025 |

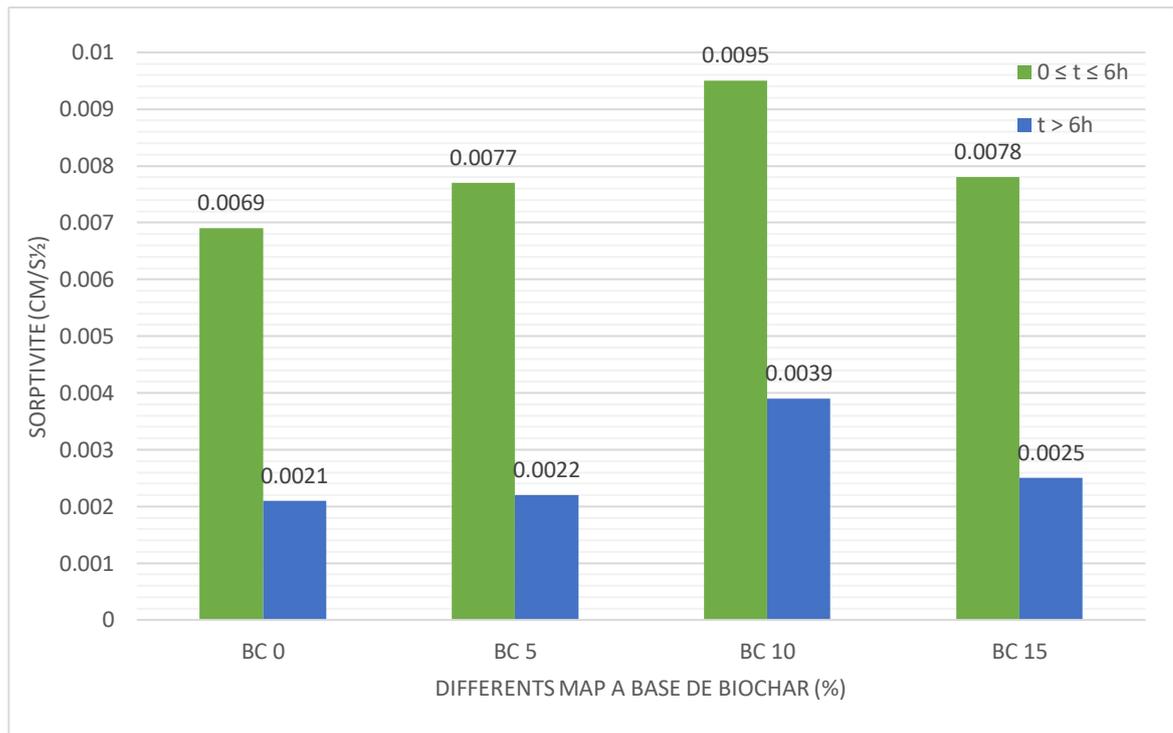


Figure III.14 : Sorptivité $0 \leq t \leq 6h$ et $t > 6h$ des différents MAP à base de biochar d'après 28 jours de cure humide.

La Sorptivité de 0 à 6h des mélanges augmente jusqu'à BC 10 ensuite elle diminue pour BC 15 par rapport à BC 0, et pour plus de 6h on constate les mêmes tendances.

Pour cela le BC 5 a une meilleure performance de Sorptivité comparé aux mélanges qui est de $0.0022 < 0.0025 < 0.0039$.

L'augmentation de Sorptivité à $0 \leq t \leq 6h$ pour tous les mélanges de biochar veut dire qu'il y a un remplissage rapide des pores lors des premières phases (macropores), par contre pour plus de 6h le remplissage est lent (micropores).

III.6. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons réalisé une revue de littérature et un exposé divers résultats relatifs à l'impact du biochar sur le comportement des MAP.

On peut donc déduire les conclusions suivantes :

- ✓ Le biochar substituant le ciment améliore l'ouvrabilité des MAP.
- ✓ Les résistances mécaniques sont améliorées à court terme et réduite à long terme par l'incorporation du biochar.
- ✓ Le biochar a un effet positif sur la résistance à la flexion surtout le BC 15 qui donne les meilleurs résultats.
- ✓ L'absorption capillaire augmente pour les mélanges à base de biochar. Le meilleur taux de substitution de ciment par biochar et le BC 5 qui est le plus proche au mortier de référence.
- ✓ La porosité des mélanges à base de biochar augmente légèrement par rapport au mortier de référence, sauf pour le BC 5 qui montre une diminution de 2%.

CONCLUSION GÉNÉRALE
ET PERSPECTIVES

Conclusion générale :

Ce mémoire nous a offert une meilleure compréhension d'une partie du comportement des MAP à base de biochar.

On peut arriver à la conclusion générale suivante :

- ✓ L'augmentation de la substitution de ciment par le biochar de bois conduit à une augmentation de l'ouvrabilité de mortier.
- ✓ La résistance à la compression est améliorée à court terme par incorporation du biochar.
- ✓ L'ajout de 5% du biochar donne une meilleure performance pour la résistance à la compression à court et long terme. Pour la flexion BC 15 donne une meilleure résistance.
- ✓ L'absorption d'eau a augmenté pour les mélanges incorporant le biochar et le taux de substitutions de 5% montre des meilleures performances comparées au mortier de référence.
- ✓ La porosité accessible à l'eau ainsi que la masse volumique donnent des valeurs comparables pour les mélanges incorporant le biochar.

Perspectives :

Pour les travaux de recherche future on propose ce qui suit :

- Formulation d'un mortier autoplaçant à base de biochar des noyaux d'olives local.
- Étude de comparaison entre le biochar local (noyau d'olive) et le biochar (bois).
- Formulation d'un béton à base de biochar.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Aditto F, SOBUZ M. H. R., SAHA A, JABIN J , KABBO Md. K. I., HASAN N. M. S., ISLAM S, Fresh, mechanical and microstructural behaviour of high-strength self-compacting concrete using supplementary cementitious materials, *Case Studies in Construction Materials*, vol. 19, août 2023, e02395.
- [2] Gupta S, KUA H & PANG S, Biochar-mortar composite: manufacturing, evaluation of physical properties and economic viability, *Construction and Building Materials*, vol. 167, 2018, pp. 874–889.
- [3] RESTUCCIA L., REGGIO A., FERRO G. A., KAMRANIRAD R., Fractal analysis of crack paths into innovative carbon-based cementitious composites, *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, vol. 90, 2017, pp. 133–141.
- [4] Akhtar A & SARMAH A., Novel biochar-concrete composites: Manufacturing, characterization and evaluation of the mechanical properties, *Science of the Total Environment*, vol. 616–617, 2018, pp. 408–416.
- [5] Gupta S, KUA H & TAN Cynthia S. Y., Use of biochar-coated polypropylene fibers for carbon sequestration and physical improvement of mortar, *Cement and Concrete Composites*, vol. 83, 2017, pp. 171–187.
- [6] Mokhtari A, Contribution à l'étude de la durabilité des matériaux renforcés par des fibres de palmier dattier, Thèse de doctorat, Université Kasdi Merbah Ouargla, 2017.
- [7] Mungyeko B Baby-Jean Robert, MARIAS Frédéric, Modeling of cement clinker chemistry and engineering of cement manufacturing process: State of the art, *International Journal of Innovation and Applied Studies*, vol. 27, n° 3, 2019, pp. 872–880.
- [8] ZOUAI K, Étude du mode de fabrication du ciment et effet des matières premières – Impact de l'utilisation du ciment sur l'environnement, Mémoire de magistère, Université Hassiba Benbouali de Chlef, 2011.
- [9] <https://www.toutsurlebeton.fr/le-ba-ba-du-beton/le-ciment-composition-et-fabrication/>
- [10] <https://www.cimentsdumaroc.com/fr/ciment>
- [11] AIE. Technologie feuille de route – Faible émission de carbone : Transition dans l'industrie du ciment. Genève : World Business Council for Sustainable Development, 2018. Disponible sur : www.wbcdcement.org (consulté le 5 décembre 2018).

- [12] BOUCHENAF A O, HAMZAOUI R, FLORENCE C, MANSOUTRE S. Fabrication de clinker par un procédé de mécanosynthèse indirecte. Communication présentée à la conférence GC'2021, Cachan, 8–9 juin 2021.
- [13] BENIA M, Influence de la surface spécifique des ciments aux ajouts minéraux sur le comportement mécanique du mortier et du béton à base de matériaux locaux, Mémoire de magistère, Université Mohamed Boudiaf de M'sila, 2006.
- [14] PAILLÈRE A. M., RAVERDY M., L'influence d'ajouts inertes ou actifs sur les propriétés des ciments, Publication n° 01297243, juillet 1977.
- [15] BOUBEKEUR T, BOULEKBACHE B, MAKHELOUF A, L'influence du laitier sur les propriétés des ciments à base de calcaire, communication présentée au Symposium International sur la Construction en Zone Sismique (SICZS_2010), Université Hassiba Benbouali de Chlef (Algérie), 26–27 octobre 2010.
- [16] <https://www.infociments.fr/glossaire/laitier-de-haut-fourneau>
- [17] NEVILLE A, Propriétés des bétons, 2^e édition, Paris, Éditions Eyrolles, 2000.
- [18] RAMACHANDRAN V. S., Manuel des adjuvants pour béton : Propriétés, science et technologie, Noyes Publications, 1995.
- [19] CHAIB O., MOULI M., HANIFI M., HAMADACHE M., Étude de l'influence de la pouzzolane naturelle sur la résistance mécanique des mortiers à base de ciments composés, Journal of Materials Science and Engineering C, vol. 7, n° 2, 2016, pp. 422–428. [En ligne] : <https://doi.org/10.1016/j.jmescn.2016.01.004>
- [20] HAMAMI A, Vers une prédiction de la perméabilité au gaz à partir de la composition des matériaux cimentaires, Thèse de doctorat, Université de La Rochelle, UFR Sciences, 17 juin 2009.
- [21] OUBRAHAM C, HAMDANI Abdelbaki N, Étude comparative des paramètres rhéologiques et physico-mécaniques des coulis de ciment avec ajout de pouzzolanes naturelles et fumée de silice en présence de superplastifiant, 33^{es} Rencontres de l'AUGC, ISABTP/UPPA, Anglet, 27–29 mai 2015.
- [22] PERLOT C, ROUGEAU P, Intérêt des métakaolins dans les bétons, Monographie Réf. 128.E, CERIB, septembre 2007.

- [23] SALHI K, Performance des mortiers et bétons à base des ciments contenant du métakaolin algérien, Thèse de doctorat, Université Mohamed Khider – Biskra, 2021.
- [24] DOH S, CHIN S, TAN K et SUIL A, « L'utilisation des cendres de boues d'épuration (SSA) comme remplacement partiel du ciment dans le béton », ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, vol. 11, n° 6, mars 2016.
- [25] BOUGLADA M, Caractérisation physico-chimique et microstructurale des ajouts minéraux, Thèse de doctorat, Université Batna 2 Mostefa Ben Boulaïd, avril 2019.
- [26] ARAB B, MEHADDENE R, BOUCHNAB Y. Substitution du ciment CPA par la poudre de verre dans les mortiers à hautes performances, in Déchets Sciences et Techniques, n°75, décembre 2017.
- [27] SHAYAN A, XU A, Value-added utilisation of waste glass in concrete, Cement and Concrete Research, vol. 34, n° 1, 2004, pp. 81–89.
- [28] IDIR R, LEMESRE L, HERY B, POINOT T, CARLES-GIBERGUES A, TAGNIT-HAMOU A, CYR M. L'utilisation du verre de recyclage dans les matériaux cimentaires et alcali-activés, in Nomad, vol. 40, n° 2, 2022.
- [29] IDIR R, CYR M et TAGNIT-HAMOU A, Pozzolanic properties of fine and coarse color-mixed glass cullet, Cement and Concrete Composites, vol. 33, n° 1, pp. 19-29, janvier 2011.
- [30] IDIR R, CYR M et TAGNIT-HAMOU A, Use of fine glass as ASR inhibitor in glass aggregate mortars, Construction and Building Materials, vol. 24, n° 7, pp. 1309–1312, juillet 2010.
- [31] CHAID R., JAUBERTHIE R., BOUKHALED A., Effet de l'ajout calcaire sur la durabilité des bétons, Lebanese Science Journal, vol. 11, n° 1, 23 février 2010.
- [32] DEBOUCHA W, BELAGRAA L, BOUZID A, OUDJIT M. L'effet des fillers de calcaire sur les propriétés physico-chimiques du mortier à base de CRS. Communication présentée au colloque international francophone NOMADE, organisé par le LMDC / AUGC, Toulouse (France), 19–20 novembre 2012.
- [33] MOULI M, KHELAFI H., Résistance des colonnes creuses rectangulaires composites courtes remplies de béton léger, Engineering Structures, vol. 29, n° 8, août 2007, pp. 1791–1797.

- [34] BROOKS J. J., MEGAT JOHARI M. A., MAZLOOM M., Effect of admixtures on the setting times of high-strength concrete, *Cement and Concrete Composites*, vol. 22, 2000, pp. 293–301.
- [35] LI J, YAO Y, A study on creep and drying shrinkage of high performance concrete, *Cement and Concrete Research*, vol. 31, n° 8, 2001, pp. 1203–1206.
- [36] GADRI K, GUTTALA A, Étude des caractéristiques physico-mécaniques des bétons de sable à base de fumée de silice, *MATEC Web of Conferences*, vol. 11, art. 01018, Université de Biskra, Alger, 2014.
- [37] TOUTANJI H. A., LUIL., EL-KORCHI T., Rôle de la fumée de silice dans la résistance à la traction directe des matériaux à base de ciment, *Materials and Structures (RILEM)*, vol. 32, n° 217, avril 1999, pp. 203–209.
- [38] MANSOUR M, Influence du métakaolin sur le comportement rhéologique et mécanique des bétons à haute performance, Thèse de doctorat, Université Saad Dahleb de Blida, 2010.
- [39] BAITE E, MESSAN A, HANNAWI K, TSOBNANG F, PRINCE W, Effet de la carbonatation sur les propriétés microstructurales et mécaniques des mortiers à base du mâchefer de charbon minéral, *AJCE – Journal of Civil Engineering and Architecture*, vol. 34, n° 1, 2016, art. 108.
- [40] AREZOUG M et AIT-OUALI I, Valorisation de déchets textiles (coton et viscose) en charbons actifs en vue de l'élimination par adsorption de l'acide clofibrique, la tétracycline et le paracétamol, Mémoire de Master, Université Abderrahmane Mira – Béjaïa, 2014/2015, p. 25–26.
- [41] WANG J, WANG S, Preparation, modification and environmental application of biochar : A review, *Journal of Cleaner Production*, vol. 227, 1er août 2019, pp. 1002–1022.
- [42] ARRIS S., Étude expérimentale de l'élimination des polluants organiques et inorganiques par adsorption sous-produits de céréale, Thèse de doctorat, Université de Constantine, 2008.
- [43] BENDIAF H., Adsorption du thorium IV par la bentonite sodique fonctionnalisée par la maghémite, Mémoire de master, Université de Tlemcen, 2014.

- [44] N'GUESSAN J, Étude expérimentale et modélisation d'un procédé séquentiel AD-OX d'élimination de polluants organiques, Thèse de doctorat, Laboratoire de Génie Chimique (LGC), Toulouse, France, 2010.
- [45] CHITOUR C. E., Physiochimie des surfaces, Éditions OPU, Alger, 2004, p. 87-1.
- [46] WEBER W. J., VANVIELT, Ann Arbor Science Publishers, Ann Arbor, vol. 1, p. 15, 1980.
- [47] BACHIR S, Élaboration des nanostructures en couches minces à base de Zn-Fe LDHs, Thèse de doctorat, Université Kasdi Merbah Ouargla, 18 avril 2024.
- [48] BOUTAIEB M, Étude expérimentale de la pyrolyse rapide des sous-produits agricoles, Thèse de doctorat, École Nationale d'Ingénieurs de Gabès, 24 février 2022.
- [49] GOYAL H.B., SEAL D., SAXENA R.C., Biocarburants issus de la conversion thermochimique des ressources renouvelables : une revue, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 12, n° 2, février 2008, pp. 504–517.
- [50] NEVES D, THUNMAN H, MATOS A, TARELHO L, GÓMEZ-BAREA A, Caractérisation et prédiction des produits de pyrolyse de la biomasse, *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 37, n° 5, septembre 2011, pp. 611–630.
- [51] SAXENA R.C., SEAL D, KUMAR S., GOYAL H.B., Voies thermochimiques pour le gaz riche en hydrogène issu de la biomasse : une revue, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 12, n° 7, septembre 2008, pp. 1909–1927.
- [52] MANYÀ J. J., Pyrolyse à des fins de biochar : une revue pour établir les lacunes actuelles dans les connaissances et les besoins de recherche, *Environmental Science & Technology*, vol. 46, n° 15, 7 août 2012, pp. 7939–7954.
- [53] ALLER M. F., Biochar properties : Transport, fate, and impact, *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, vol. 46, n° 14–15, août 2016, pp. 1183–1296.
- [54] WEBER K., QUICKER P., Properties of biochar, *Fuel*, vol. 217, avril 2018, pp. 240–261.
- [55] DI BLASI C., BRANCA C., SANTORO A., GONZALEZ HERNANDEZ E., Pyrolytic behavior and products of some wood varieties, *Combustion and Flame*, vol. 124, n° 1, janvier 2001, pp. 165–177.

- [56] DEMIRBAS A., Effect of initial moisture content on the yields of oily products from pyrolysis of biomass, *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, vol. 71, n° 2, juin 2004, pp. 803–815.
- [57] BABU B. V., Biomass pyrolysis : a state-of-the-art review, *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, vol. 2, n° 5, septembre 2008, pp. 393–414.
- [58] COLLARD F. X., BLIN J., A review on pyrolysis of biomass constituents : Mechanisms and composition of the products obtained from the conversion of cellulose, hemicelluloses and lignin, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 38, supplément C, octobre 2014, pp. 594–608.
- [59] DEMIRBAS A., ARIN G., An overview of biomass pyrolysis, *Energy Sources, Part A : Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, vol. 24, 2002, pp. 471–482.
- [60] KEECH O., CARCAILLET C., NILSSON M. C., Adsorption de composés allélopathiques par le charbon de bois dérivé du bois : le rôle de la porosité du bois, *Oecologia*, vol. 272, n° 4, 2005, pp. 291–300.
- [61] GUNDALE M. J., DELUCA T. H., Temperature and source material influence ecological attributes of ponderosa pine and Douglas-fir charcoal, *Forest Ecology and Management*, vol. 231, 2006, pp. 86–93.
- [62] SCHIMMELPFENNIG S., GLASER B., One step forward toward characterization: Some important material properties to distinguish biochars, *Journal of Environmental Quality*, vol. 41, n°4, 2012, pp. 1001–1013. (Numéro spécial : Environmental benefits of biochar)
- [63] PRINS R., WAYNE T., MARIER J., GEOFF A., TIM C., BRANDON D., Design, construction, and analysis of a farm-scale biochar production system, *Actes de la conférence Catalyzing Innovation*, 24–26 mars 2011.
- [64] MULLEN A. C., BOATENG A. A., GOLDBERG N. M., LIMA M. I., LAIRD D. A., HICKS K. B., Bio-oil and bio-char production from corn cobs and stover by fast pyrolysis, *Biomass and Bioenergy*, vol. 34, n° 1, 2009, pp. 67–74.
- [65] DOWNIE A., CROSKY A., MUNROE P., Physical properties of biochar, in LEHMANN J., JOSEPH S. (dirs.), *Biochar for Environmental Management : Science and Technology*, Londres, Earthscan Publications, 2009, pp. 13–32.

- [66] NOVAK J. M., LIMA I., XING B., GASKIN J. W., STEINER C., DAS K. C., AHMEDNA M., REHRAH D., WATTS D. W., BUSSCHER W. J., SCHOMBERG H., Characterization of designer biochar produced at different temperatures and their effects on a loamy sand, *Annals of Environmental Science*, vol. 3, 2009, pp. 195–206.
- [67] SINGH R., BABU J. N., KUMAR R., SRIVASTAVA P., SINGH P., RAGHUBANSHI A. S., Multifaceted application of crop residue biochar as a tool for sustainable agriculture: An ecological perspective, *Ecological Engineering*, vol. 77, 2015, pp. 324–347.
- [68] LEHMANN J., Une poignée de carbone, *Nature*, vol. 447, 2007, pp. 143–144.
- [69] LIANG B., SOLOMON D., KINYANGI J., GROSSMAN J., O'NEILL B., SKJEMSTAD J. O., THIES J., LUIZÃO F. J., PETERSEN J., NEVES E. G., Black carbon increases cation exchange capacity in soils, *Soil Science Society of America Journal*, vol. 70, n° 5, 2006, pp. 1719–1730.
- [70] CHENG C.-H., LEHMANN J., THIES J. E., BURTON S. D., ENGELHARD M. H., Oxidation of black carbon by biotic and abiotic processes, *Organic Geochemistry*, vol. 37, n° 11, 2006, pp. 1477–1488.
- [71] BRENNAN J. K., BANDOSZ T. J., THOMSON K. T., GUBBINS K. E., Water in porous carbons, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, vol. 187–188, 2001, pp. 539–568.
- [72] JOSEPH S., PEACOCKE C., LEHMANN J., MUNROE P., « Developing a biochar classification and test methods », in : LEHMANN J., JOSEPH S. (éds), *Biochar for Environmental Management: Science and Technology*, Earthscan, Washington, 2009, pp. 106–126.
- [73] UNGER R., KILLORN R., « Effect of three different qualities of biochar on selected soil properties », *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, vol. 42, n°18, 2011, pp. 2274–2283.
- [74] RAJKOVICH S., ENDERS A., HANLEY K., HYLAND C., ZIMMERMAN A.R., LEHMANN J., « Corn growth and nitrogen nutrition after additions of biochars with varying properties to a temperate soil », *Biology and Fertility of Soils*, vol. 48, n° 3, 2012, pp. 271–284.

- [75] ZEGHIOUD H, FRYDA L, DJELAL H, ASSADI A, KANE A. Un examen complet du biochar dans l'élimination des polluants organiques des eaux usées : caractérisation, toxicité, activation/fonctionnalisation et facteurs d'influence du traitement, juin 2022.
- [76] SABA F. Étude des effets de l'utilisation combinée du biochar et de la fertilisation microdose sur les propriétés agro-pédologiques des zones ouest et centre-nord du Burkina Faso. Thèse de doctorat, Université de Liège, Gembloux Agro-Bio Tech, Belgique, 2023, 183 p., 21 tableaux, 33 figures.
- [77] MENSAH R, WANG D, SHANMUGAM V, SAS G, FÖRSTH M, DAS O. Comportement au feu des composites cimentaires à base de biochar. Composites Partie C : Accès libre, Volume 100471, juillet 2024.
- [78] ZHANG Q, DONG S, WU F, CAI Y, XIE L, HUANG C, ZHAO J, YANG S, XU F, ZHU Z, LUO P, Étude des performances macroéconomiques et du mécanisme du béton ultra-haute performance modifié au biochar : études de cas sur les matériaux de construction, *Case Studies in Construction Materials*, article e03595, décembre 2024.
- [79] GUPTA S, KUA H, Application of rice husk biochar as filler in cenosphere modified mortar : preparation, caractérisation et performance en température élevée, *Construction and Building Materials*, vol. 253, 2020, art. 119083.
- [80] CHOUGAN M, MAROTTA E, LAMASTRA Francesca R., VIVIO F, MONTEPERELLI G, IANNIRUBERTO U, BIANCO A, A systematic study on EN-998-2 premixed mortars modified with graphene-based materials, *Construction and Building Materials*, vol. 227, 2019, Article 116701.
- [81] SIKORA P, WOLINSKI P, CHOUGAN M, MADRASZEWSKI S, WĘGRZYNSKI W, PAPIS Bartłomiej K., FEDEROWICZ K, GHAFAR Seyed H, STEPHAN D, A systematic experimental study on biochar-cementitious composites : Towards carbon sequestration, *Industrial Crops & Products*, vol. 184, 2022, art. 115103.
- [82] DANISH A, MOSABERPANAH M, SALIM M, AHMAD N, AHMAD F, AHMAD A, Reusing biochar as a filler or cement replacement material in cementitious composites: A review, *Construction and Building Materials*, vol. 300, 2021, art. 124295.
- [83] CHEN T, YANG Z, LIU H, LI L, QIN L, GAO X, Effect of biochar characteristics on freeze-thaw durability of biochar–cement composites, *Journal of Building Engineering*, vol. 102, mai 2025, art. 111959.

[84] DANISH A, MOSABERPANAH M, SALIM M , AHMAD N, AHMAD F, AHMAD A, Reusing biochar as a filler or cement replacement material in cementitious composites: A review, *Construction and Building Materials*, vol. 300, 2021, art. 124295.

[85] AKINYEMI B, ADESINA A, Recent advancements in the use of biochar for cementitious applications : A review, *Journal of Building Engineering*, vol. 32, 2020, art. 101705.

[86] DIXIT A, VERMA A, PANG S, Dual waste utilization in ultra-high performance concrete using biochar and marine clay, *Cement and Concrete Composites*, vol. 120, 2021, art. 104049.

ANNEXES

MEDAFLOW 30

Conforme à la norme EN 934-2: TAB 1, TAB 3.1
ET TAB 3.2 NA 774.

**Super plastifiant
Haut réducteur d'eau**

DESCRIPTION

Le **MEDAFLOW 30** est un super plastifiant haut réducteur d'eau de la troisième génération. Il est conçu à base de polycarboxylates d'Ether qui améliorent considérablement les propriétés des bétons.

Le **MEDAFLOW 30** permet d'obtenir des bétons et mortiers de très haute qualité.

En plus de sa fonction principale de superplastifiant, il permet de diminuer la teneur en eau du béton d'une façon remarquable.

Le **MEDAFLOW 30** ne présente pas d'effet retardateur.

DOMAINES D'APPLICATION

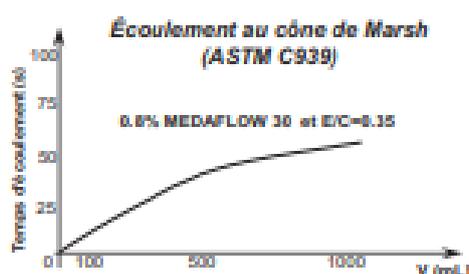
- Bétons à hautes performances
- Bétons auto - plaçant
- Bétons pompés
- Bétons précontraints
- Bétons architecturaux.

PROPRIÉTÉS

Grâce à ses propriétés le **MEDAFLOW 30** permet :

Sur béton frais :

- Obtention d'un rapport E/C très faible
- Amélioration considérable de la fluidité
- Une très bonne maniabilité
- Éviter la ségrégation
- Faciliter la mise en œuvre du béton



Sur béton durci :

- Augmenter les résistances mécaniques à jeune âge et à long terme (voir tableau).
- Diminuer la porosité
- Augmenter la durabilité
- Diminuer le retrait et le risque de fissuration

| Désignation | Rc (MPa) | | |
|-------------------------------|----------|------|------|
| | 3J | 7J | 28J |
| MEDAFLOW 30 (1.4%) | 39.2 | 54.7 | 62.2 |

CARACTÉRISTIQUES

- Aspect Liquide
- Couleur Brun clair
- pH 6 – 6,5
- Densité 1,07 ± 0,01
- Teneur en chlore < 0,1 g/l
- Extrait sec 30%

MODE D'EMPLOI

Le **MEDAFLOW 30** est introduit dans l'eau de gâchage.

Il est recommandé d'ajouter l'adjuvant dans le béton après que 50 à 70% de l'eau de gâchage ait déjà été introduite.

DOSAGE

Plage de dosage recommandée :

0,5 à 2,0 % du poids de ciment soit 0.46 à 1.85 litre pour 100 Kg de ciment.

Le dosage optimal doit être déterminé sur chantier en fonction du type de béton et des effets recherchés.

CONDITIONNEMENT ET STOCKAGE

Les renseignements donnés dans cette notice sont basés sur notre connaissance et notre expérience à ce jour. Il est recommandé de procéder à des essais de convenance pour déterminer la fourchette d'utilisation tenant compte des conditions réelles de chantier.



Zone Industrielle Oued Smar – BP85 Oued Smar – 16270 Alger
Tél : (213) 021 51 66 81 & 82
Fax : (213) 021 51 64 22 & 021 51 65 23
www.granitex-dz.com - E-mail: granitex@granitex-dz.com



Figure : Fiche technique d'adjuvants MEDAFLOW 30

Feuille Excel donnant composition et résultats des essais sur mortier

Essais sur Mortier Entrer data dans cellules en rouge
Valeurs calculées dans cellules en noir

Référence du mélange Essai N° **CEM I 52,5** Date **11/06/2025**

0 % de Mg

0 % de Poudre de marbre

volume de mortier (litres) **1000,00**

sable/mortier vol **0,50**

E/P par vol. **1,16** poudre vol (%) **23,148** Eau volume (**26,852**

composition Poudre(vol %) type

ciment portland **100**

Mg **0**

Poudre de Marbre **0**

superplast - MEDAFLOW30 **0,70** % (Sp/P)

Densité relative de la poudre **3,05**

teneur en eau du sable

| | humidité (%ab) | absorption(%correction (%)) |
|------------------|----------------|-----------------------------|
| poids humide (g) | 200 | 0,00 |
| poids sec (g) | 200 | 2,22 |

| Materiaux | Volume | Densité | Masse | Contenance d'eau | | poids mélange | |
|---------------------------------|-----------------|-------------------|----------|------------------|---------|-----------------|-------------------------|
| | litres | kg/m ³ | kg | % | kg | kg | |
| poudre | 231,481 | 3050 | 706,019 | | | 706,019 | |
| Ciment | 231,481 | 3050 | 706,019 | | | 706,019 | |
| Mg | 0,000 | 2685 | 0,000 | | | 0,000 | |
| Poudre de marbre | 0,000 | 2700 | 0,000 | | | 0,000 | |
| Eau | 268,519 | 1000 | 268,5 | | | 294,47 | W1 <u>206,132</u> 70% W |
| | | | | | | | W2 <u>88,342</u> 30% W |
| superplastifiant MEDAFLOW 30 | | 1070 | 4,94 | 70 | 3,459 | 4,942 | |
| Sable | 500,000 | 2650 | 1325,000 | -2,22 | -29,415 | 1325,000 | |
| Total | 1000,000 | | | | | 2330,435 | |

E/P poids = 0,400

| 100%C | | | |
|---------------------------------|---------------|---------------|---------------|
| Volume | 1,5 | poids mélange | |
| | | g | |
| poudre | | 1059,028 | |
| Ciment | 0,347 | 1059,03 | |
| Mg | 0,000 | 0,00 | |
| Poudre de m | 0,000 | 0,00 | |
| Eau | 0,403 | 441,71 | W1 309,2 |
| | E théorique | 402,78 | W2 132,5 |
| superplastifiant MEDAFLOW 30 | | 7,41 | |
| Sable | 0,7500 | 1987,5 | |
| Total | 1,5000 | 3495,7 | |

Figure : Feuille Excel donnant composition et résultats des essais sur le MAP

Tableau : Résistance à la compression et flexion des mortiers à 7jours.

| References Eprouvetes | (%) ajout | Resistance Flexion | Resistance Compression | |
|--------------------------|--------------|-----------------------|---------------------------|------|
| 1 | 0% | 1,6 | 34,4 | |
| | | | 35 | |
| 2 | | 1,4 | 33,5 | |
| | | | 32,6 | |
| 3 | | 1,3 | 35 | |
| | | | 34,4 | |
| 4 | | 5% | 1,5 | 46,6 |
| | | | | 48,1 |
| 5 | | | 1,45 | 46 |
| | | | | 44,2 |
| 6 | | | 1,49 | 46 |
| | | | | 45 |
| 7 | | | 10% | 1,66 |
| | 44,5 | | | |
| 8 | 1,60 | | | 46,6 |
| | | | | 45 |
| 9 | 1,51 | | | 44,2 |
| | | | | 41,6 |
| 10 | 15% | 1,61 | | 42,2 |
| | | | | 41,5 |
| 12 | | 1,62 | | 43,3 |
| | | | 40,5 | |
| 13 | | 1,60 | 41,2 | |
| | | | 42,6 | |

Tableau : Résistance à la compression et flexion des mortiers à 28jours.

| References Eprouvetes | (%) ajout | Resistance Flexion | Resistance Compression | |
|--------------------------|--------------|-----------------------|---------------------------|------|
| 1 | 0% | 1,50 | 62,2 | |
| | | | 63,6 | |
| 2 | | 1,50 | 64,5 | |
| | | | 58,8 | |
| 3 | | 1,66 | 60 | |
| | | | 61,2 | |
| 4 | | 5% | 1,51 | 55,5 |
| | | | | 60 |
| 5 | | | 1,70 | 56,2 |
| | | | | 55,5 |
| 6 | | | 1,62 | 54,5 |
| | | | | 53,6 |
| 7 | | | 10% | 1,50 |
| | 52,2 | | | |
| 8 | 1,60 | | | 49,5 |
| | | 55 | | |
| 9 | 1,55 | 51,1 | | |
| | | 52,6 | | |
| 10 | 15% | 1,70 | | 42,4 |
| | | | | 44,5 |
| 12 | | 1,66 | | 46,5 |
| | | | 42,5 | |
| 13 | | 1,80 | 44,6 | |
| | | | 48 | |

Tableau : Résistance à la compression et flexion des mortiers a 45 jours.

| References Eprouvetes | (%) ajout | Resistance Flexion | Resistance Compression | |
|--------------------------|--------------|-----------------------|---------------------------|------|
| 1 | 0% | 1,60 | 66,9 | |
| | | | 71,5 | |
| 2 | | 1,69 | 65,6 | |
| | | | 66 | |
| 3 | | 1,72 | 60,9 | |
| | | | 64 | |
| 4 | | 5% | 1,60 | 62,5 |
| | | | | 61,1 |
| 5 | | | 1,69 | 65,5 |
| | | | | 60,5 |
| 6 | | | 1,65 | 62,2 |
| | | | | 60 |
| 7 | | 10% | 1,64 | 55,6 |
| | 56,6 | | | |
| 8 | 1,62 | | 58 | |
| | | | 52,5 | |
| 9 | 1,60 | | 55,4 | |
| | | | 54 | |
| 10 | 15% | 1,77 | 45,5 | |
| | | | 47,5 | |
| 12 | | 1,80 | 48 | |
| | | | 44,5 | |
| 13 | | 1,84 | 45 | |
| | | | 49 | |

Tableau : Regroupement des résultats de masse volumique et porosité accessible à l'eau à 28 jours.

| Age | Mortier | BC 0 | | BC 5 | | BC 10 | | BC 15 | |
|-------------|--------------------------------|-------|-------|-------|------|-------|-------|-------|-------|
| 28 jours | Φ (%) | 18,17 | 19,50 | 18,73 | 18,1 | 19,80 | 19,83 | 20,86 | 19,98 |
| | ρ (g/cm ³) | 2,03 | 1,99 | 2,04 | 2,03 | 2 | 2,02 | 2 | 2 |

Tableau : Les valeurs d'absorption d'eau des différents mortiers après 28 jours de cure humide.

| Temps (s ^{1/2}) | temps (min) | BC 0 | | BC 5 | | BC 10 | | BC 15 | |
|---------------------------|----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 7,74 | 1 | 0,062 | 0,043 | 0,081 | 0,037 | 0,043 | 0,043 | 0,031 | 0,025 |
| 10,95 | 2 | 0,043 | 0,106 | 0,031 | 0,131 | 0,006 | 0,156 | 0,05 | 0,087 |
| 17,32 | 5 | 0,118 | 0,15 | 0,2 | 0,243 | 0,062 | 0,168 | 0,093 | 0,131 |
| 24,49 | 10 | 0,137 | 0,168 | 0,262 | 0,3 | 0,156 | 0,231 | 0,131 | 0,181 |
| 34,64 | 20 | 0,306 | 0,287 | 0,337 | 0,456 | 0,262 | 0,437 | 0,25 | 0,281 |
| 42,42 | 30 | 0,481 | 0,525 | 0,462 | 0,506 | 0,362 | 0,393 | 0,268 | 0,325 |
| 60 | 60 | 0,6 | 0,625 | 0,656 | 0,818 | 0,756 | 0,756 | 0,593 | 0,581 |
| 84,85 | 120 | 0,743 | 0,7 | 0,837 | 0,993 | 0,987 | 0,843 | 0,718 | 0,625 |
| 103,92 | 180 | 0,868 | 0,806 | 0,937 | 1,006 | 1,075 | 0,937 | 0,943 | 0,762 |
| 120 | 240 | 0,825 | 0,918 | 0,987 | 1,068 | 1,175 | 0,962 | 0,918 | 0,793 |
| 134,16 | 300 | 0,9 | 0,956 | 1,031 | 1,093 | 1,275 | 1,012 | 1,087 | 0,9 |
| 146,96 | 360 | 0,993 | 0,981 | 1,1 | 1,143 | 1,637 | 1,275 | 1,168 | 1,125 |
| 293,93 | 1440 | 1,068 | 1,062 | 1,368 | 1,506 | 2,468 | 1,668 | 1,493 | 1,268 |
| 415,69 | 2880 | 1,325 | 1,268 | 1,693 | 1,556 | 3,106 | 1,981 | 1,768 | 1,625 |
| 509,11 | 4320 | 1,443 | 1,6 | 1,9 | 1,9 | 3,856 | 2,3 | 2,075 | 1,812 |
| 777,68 | 10080 | 1,9 | 2,231 | 2,462 | 2,256 | 4,937 | 2,687 | 2,475 | 2,431 |
| 831,38 | 11520 | 2,206 | 2,381 | 2,7 | 2,06 | 5,506 | 3,168 | 2,887 | 2,743 |