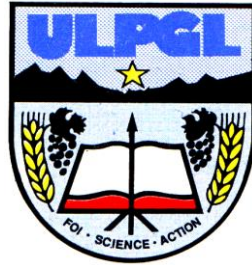


UNIVERSITE LIBRE DES PAYS DES GRANDS LACS
FACULTE DE SCIENCES ET TECHNOLOGIES
DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL



BP. 368 GOMA
www.ulpgl.net

DEVELOPPEMENT DES BETONS A FAIBLE
EMPREINTE CARBONE PAR SUBSTITUTION
PARTIELLE DU CIMENT PAR LE BIOCHARBON

Par **MAHORO NSENGIYUMVA Marie-jeanne**
Travail présenté et défendu en vue de l'obtention du
Diplôme de Bachelor en Génie civil
Option : Génie civil
Directeur : Prof. Dr Ir CHERIF BISHWEKA
Encadreur : Ir KOKO KATUMBI PASCAL

ANNEE ACADEMIQUE 2024 - 2025

Epigraphe

« Ceux qui contemplent la beauté de la Terre trouvent des réserves de force qui dureront aussi longtemps que la vie. »

Rachel Carson,

Dédicace

À nos chers parents NSENGIYUMVA NKIZINKIKO Elie et UWIMANA RUBAKARE
Florence.

MAHORO NSENGIYUMVA Marie-jeanne

Remerciements

Le présent travail n'est nullement le fruit de nos seuls efforts, mais résulte de la contribution de plusieurs personnes. Il serait ingrat de notre part de ne pas reconnaître leurs interventions. En premier lieu, nos remerciements s'adressent à l'Éternel Dieu pour la grâce qu'Il ne cesse de nous accorder.

Nos remerciements s'adressent aussi à notre chère université, ULPGL, en particulier à la Faculté des Sciences et Technologies Appliquées, pour la qualité de la formation et l'accompagnement dont nous avons bénéficié tout au long de ce cycle.

Nous exprimons notre reconnaissance toute particulière au Professeur Docteur Ingénieur Chérif BISHWEKA, qui, malgré ses nombreuses responsabilités, a accepté de nous guider et de nous diriger pour la réalisation de ce travail. Nous remercions également l'Ingénieur KOKO KATUMBI Pascal, pour son encadrement précieux malgré ses multiples engagements.

Nous exprimons notre profonde gratitude à nos chers parents, NSENGIYUMVA NKIZINKIKO Elie et UWIMANA RUBAKARE Florence, ainsi qu'à nos frères et sœurs, KAYENGA Fiston, NSENGIYUMVA Claudine, NSENGIYUMVA Providence, NSENGIYUMVA Justin, NSENGIYUMVA Josué, NSENGIYUMVA Eliane, NSENGIYUMVA Elisha, NSENGIYUMVA Enock pour leurs encouragements et leur présence.

Nous remercions également nos chères amies et sœurs UMUTONI NKIZINKIKO Jeannette, MBABAZI KAREKEZI Anaïs pour leur accompagnement durant la réalisation de ce travail.

Nos remerciements vont également à tous nos amis, camarades et aînés scientifiques, en particulier KULIMUSHI Jonas, BAHATI Joel Joe, MIGISHA AMINI Romain, KAKANDA NGOY Yves qui nous ont apportés une aide précieuse.

Enfin, nous n'oublions pas toutes les personnes, dont les noms ne sont pas cités ici, mais qui, par leur aide discrète et constante, ont contribué à la réussite de ce travail. À elles également, nous exprimons notre sincère gratitude.

MAHORO NSENGIYUMVA Marie-jeanne

Résumé

Dans un contexte de transition écologique et de croissance soutenue des besoins en infrastructures, ce travail vise le développement d'un béton à faible empreinte carbone par la substitution partielle du ciment par le biocharbon, tout en maintenant des performances mécaniques conformes aux exigences du Génie civil. La démarche méthodologique adoptée repose sur la caractérisation des matériaux constitutifs du béton, à savoir le ciment, les granulats et le biocharbon issu de la pyrolyse de biomasses résiduelles. La formulation des bétons a été réalisée selon la méthode de Dreux–Gorisse, avec un dosage de référence de 400 kg/m³ de ciment. Six bétons ont été étudiés : un béton témoin et cinq bétons contenant respectivement 1 %, 3 %, 5 %, 7 % et 9 % de biocharbon en substitution partielle du ciment. Les propriétés des bétons ont été caractérisées à l'état frais par un essai d'ouvrabilité, et à l'état durci par la détermination de la masse volumique et de la résistance à la compression à 3, 7 et 28 jours d'âge. Les résultats expérimentaux indiquent que l'incorporation du biocharbon provoque une diminution des résistances mécaniques aux jeunes âges, notamment à 3 jours, mais que cet effet s'atténue progressivement. À 28 jours, les bétons substitués présentent des performances mécaniques comparables, voire supérieures, à celles du béton témoin, car le biocharbon agit comme un réservoir d'eau qui se libère progressivement, permettant une hydratation plus complète et continue des grains de ciment. Le béton de référence atteint ainsi une résistance à la compression de 21,261 MPa, tandis que les bétons contenant 5 % et 9 % de biocharbon développent respectivement des résistances de 21,842 MPa et 21,749 MPa, montrant que ces taux de substitution permettent de maintenir, voire d'améliorer, les performances mécaniques du béton. Cette substitution s'accompagne toutefois d'une augmentation du coût de production : le prix de revient du béton témoin est de 129,97 \$/m³, contre 143,21 \$/m³ pour le béton BD9 %. Cette évolution met en évidence un compromis entre performance environnementale et coût économique, tout en maintenant la conformité aux exigences techniques du béton de génie civil.

Mots clés : Béton à faible empreinte carbone, Biocharbon, Substitution du ciment.

Abstract

In a context of environmental transition and increasing demand for infrastructure, this study aims to develop low-carbon concrete by partially replacing cement with biochar, while keeping adequate mechanical performance for civil engineering use. The methodology is based on the characterization of the main concrete materials: cement, aggregates, and biochar obtained from the pyrolysis of residual biomass. The concrete mixes were designed using the Dreux–Gorisse method, with a reference cement content of 400 kg/m³. Six types of concrete were tested: one control concrete and five others containing 1%, 3%, 5%, 7%, and 9% biochar as partial cement replacement. The properties were evaluated in the fresh state through a workability test, and in the hardened state by measuring density and compressive strength at 3, 7, and 28 days. The results show that adding biochar reduces strength at early ages, especially at 3 days, but this effect decreases over time. At 28 days, the concretes with biochar show similar or slightly higher strength compared to the control concrete. This is because biochar acts as a water reservoir, releasing water slowly and helping better cement hydration. The control concrete reached a compressive strength of 21.261 MPa, while the concretes with 5% and 9% biochar reached 21.842 MPa and 21.749 MPa, respectively. These results show that these replacement levels can maintain or even improve the strength of concrete. However, the cost increases with biochar use: the control concrete costs \$129.97/m³, while the concrete with 9% biochar costs \$143.21/m³. This shows a balance between environmental benefits and economic cost, while still meeting technical requirements.

Keywords: Low-carbon concrete, Biochar, Cement substitution.

Table de matières

Epigraphe	i
Dédicace.....	ii
Remerciements.....	iii
Résumé.....	iv
Table de matières	vi
Liste de abréviations	x
Liste de tableaux	xi
Liste de figures.....	xiii
INTRODUCTION GENERALE.....	1
Chapitre 1 GENERALITES SUR LE THEME.....	5
1.1 INTRODUCTION.....	5
1.2 CONSTITUANT DU BETON.....	5
1.2.1 Ciment.....	6
1.2.2 Granulats	10
1.2.3 Eau de gâchage	14
1.2.4 Adjuvants	15
1.3 TYPOLOGIE DE BETON [11]	16
1.3.1 Béton ordinaire.....	16
1.3.2 Béton précontraint.....	17
1.3.3 Béton auto plaçant.....	17
1.3.4 Béton à haute performance	17
1.3.5 Béton à très haute performance.....	17

1.4	CLASSIFICATION DES BÉTONS [11].....	17
1.4.1	Classification des bétons selon la masse volumique.....	18
1.4.2	Classification des bétons selon leur résistance	18
1.4.3	Classification des bétons selon la destination.....	19
1.4.4	Classification des bétons selon le genre de liant utilisé [16]	19
1.5	MÉTHODES DE FORMULATION DES BÉTONS.....	19
1.5.1	Méthode de DREUX-GORISSE.....	20
1.5.2	Méthode de BOLOMEY [11]	20
1.5.3	Méthode de FULLER-THOMPSON [11]	21
1.5.4	Méthode de Faury [12].....	21
1.5.5	Méthode de BARON-OLIVIER [11].....	22
1.6	PROPRIETE DU BETON	23
1.6.1	Propriétés à l'état frais	23
1.6.2	Propriétés à l'état durci	23
1.7	PATHOLOGIES DU BETON	25
1.7.1	Pathologies physico-chimiques [12]	25
1.7.2	Pathologies mécaniques [12]	26
1.8	ADDITIFS DANS LE BETON.....	26
1.9	DOMAINES D'UTILISATION DU BETON	27
1.9.1	Béton dans le bâtiment.....	28
1.9.2	Béton dans les travaux publics.....	28
1.10	CONCLUSION PARTIELLE	29
Chapitre 2 METHODOLOGIE.....		30
2.1	INTRODUCTION.....	30
2.2	NATURE ET ORIGINE DE CONSTITUANTS.....	30
2.2.1	Ciment.....	30
2.2.2	Granulats	30
2.2.3	Biocharbon.....	31
2.2.4	Eau de gâchage	31

2.3	CARACTERISATION DES CONSTITUANTS	31
2.3.1	Échantillonnage.....	31
2.3.2	Analyse granulométrique	33
2.3.3	Degré de propreté sable	35
2.3.4	Masse volumique absolue	38
2.3.5	Masse volumique apparente.....	39
2.3.6	Essai Los Angeles	40
2.3.7	Absorption d'eau.....	43
2.3.8	Masse volumique absolue du ciment et du biocharbon	43
2.3.9	Essai de consistance [28]	45
2.4	FORMULATION DU BÉTON.....	47
2.4.1	Choix et justification de la méthode	47
2.4.2	Méthode de DREUX GORISSE	48
2.5	CARACTÉRISATION DES BÉTONS	58
2.5.1	Essai sur le béton frais	58
2.5.2	Essais sur le béton durci.....	60
2.6	DETERMINATION DE LA REDUCTION DE CARBONE APRES SUBSTITUTION	61
2.6.1	But de la méthode	61
2.6.2	Principe de la méthode.....	62
2.6.3	Mode opératoire	62
2.6.4	Expressions de résultats	62
2.7	EVALUATION DU COUT DE REVIENT DU BETON.....	64
2.8	PROGRAMME EXPÉRIMENTAL	65
2.9	CONCLUSION PARTIELLE.....	66
Chapitre 3 PRESENTATION ET INTERPRETATION DES RESULTATS ...		68
3.1	INTRODUCTION.....	68
3.2	CARACTERISATION DES MATERIAUX	68
3.2.1	Analyse granulométrique	68

3.2.2	Coefficient d'uniformité Cu et de courbure Cz	70
3.2.3	Module finesse	70
3.2.4	Degré de propreté du sable	70
3.2.5	Masse volumique de granulats	71
3.2.6	Essai de consistance	71
3.2.7	Essai de Los Angeles	72
3.2.8	Taux d'absorption d'eau	72
3.3	RESULTATS DE LA FORMULATION DU BETONS	73
3.3.1	Données de base	73
3.3.2	Calcul des dosages	73
3.3.3	Dosage en granulats	76
3.4	CARACTERISTIQUE DES BETONS	78
3.4.1	Caractéristique à l'état frais	78
3.4.2	Caractéristique à l'état durci	81
3.5	SUBSTITUTIONS PARTIELLE DU CIMENT ET DETERMINATION DE LA QUANTITE REDUCTION DE CARBONE	85
3.6	EVALUATION DU COUT	85
3.7	CONCLUSION PARTIELLE	87
	CONCLUSION GENERALE	89
	Bibliographie	91
	ANNEXES	94

Liste de abréviations

- BHP : Béton à Haute Performance
BTHP : Béton à Très Haute Performance
C : Dosage en ciment
CHF : Ciment de Haut-Fourneau
CLC : Ciment au Laitier et aux Cendres
CO₂ : Dioxyde de carbone
CPA : Ciment Portland Artificiel
CPJ : Ciment Portland Composé
CPZ : Ciment Pouzzolanique
M_f : Module de finesse
C_u : Coefficient d'uniformité des granulats
C_z : Coefficient de courbure des granulats
D_{max} : Dimension maximale des granulats
E/C : Rapport Eau / Ciment
f_{ck} : Résistance caractéristique à la compression du béton
G : Dosage en gravier
LA : Los Angeles
NF EN : Norme Française- Norme Européenne
S : Dosage en sable
ULPGL : Université Libre des Pays des Grands Lacs

Liste de tableaux

<i>Tableau 1-1 spécification mécaniques et physiques des ciments [7]</i>	8
<i>Tableau 1-2 différents types de ciments courants normalisés avec indication [8]</i>	9
<i>Tableau 1-3 classification selon la masse volumique</i>	18
<i>Tableau 1-4 Classes des bétons selon la résistance</i>	18
<i>Tableau 2-1 Expressions quantitatives des degrés de propreté des sables [7]</i>	37
<i>Tableau 2-2 Types de graviers selon le coefficient LA [7]</i>	42
<i>Tableau 2-3 Les valeurs approximatives du coefficient granulaire G [33]</i>	50
<i>Tableau 2-4 Correction sur le dosage en eau en fonction de D_{max} [8]</i>	53
<i>Tableau 2-5 Teneur en eau approximative des granulats courants en litres pour un metre cube de materiau (en volume apparent) [8]</i>	53
<i>Tableau 2-6 Valeur du terme correcteur K [8]</i>	55
<i>Tableau 2-7 Valeurs du coefficient de compacité [7]</i>	56
<i>Tableau 2-8 Appréciation de la consistance du béton en fonction de l'affaissement au cône [8]</i>	59
<i>Tableau 3-1 coefficient d'uniformité et de courbure</i>	70
<i>Tableau 3-2 Equivalence sables</i>	71
<i>Tableau 3-3 Valeurs des masses volumiques des granulats</i>	71
<i>Tableau 3-4 Résultats Los Angeles</i>	72
<i>Tableau 3-5 Taux d'absorptions d'eau</i>	72
<i>Tableau 3-6 Données de base</i>	73
<i>Tableau 3-7 Dosage en eau et en ciment pour le Béton témoins</i>	74
<i>Tableau 3-8 Dosage en eau et en ciment pour le Béton par substitutions 1%</i>	74
<i>Tableau 3-9 Dosage en eau et en ciment pour le Béton par substitutions 3%</i>	74
<i>Tableau 3-10 Dosage en eau et en ciment pour le Béton par substitutions 5%</i>	74
<i>Tableau 3-11 Dosage en eau et en ciment pour le Béton par substitutions 7%</i>	75
<i>Tableau 3-12 Dosage en eau et en ciment pour le Béton par substitutions 9%</i>	75
<i>Tableau 3-13 Coordonnées de la courbe de référence OAB</i>	76

<i>Tableau 3-14 Dosage massique</i>	78
<i>Tableau 3-15 Affaissement au cône d'Abrams</i>	79
<i>Tableau 3-16 masse volumique à l'état frais</i>	80
<i>Tableau 3-17 masse volumique à l'état durci</i>	82
<i>Tableau 3-18 Résistance à la compressions</i>	83
<i>Tableau 3-19 Substitution du ciment et détermination de la quantité réduite de carbone</i>	85
<i>Tableau 3-20 Evaluations du coûts</i>	86

Liste de figures

<i>Figure 1-1 Constituants et ordre de grandeur des proportions d'un béton ordinaire [6]</i>	<i>6</i>
<i>Figures 2-1 Matériels analyse granulométrique</i>	<i>34</i>
<i>Figures 2-2 Matériels utilisés pour le degré de propreté sable.....</i>	<i>36</i>
<i>Figure 2-3 Matériel utilisé pour la masse volumique absolue.</i>	<i>39</i>
<i>Figure 2-4 Moule CBR.....</i>	<i>40</i>
<i>Figures 2-5 Machine de Los Angeles.....</i>	<i>41</i>
<i>Figure 2-6 Matériels nécessaire pour la masse volumique du ciment et du biocharbon</i>	<i>44</i>
<i>Figure 2-7 Appareil de Vicat</i>	<i>47</i>
<i>Figure 2-8 Cône d'Abrams</i>	<i>49</i>
<i>Figure 2-9 Abaque permettant d'évaluer approximativement le dosage en ciment à prévoir en fonction du rapport C/E et de l'ouvrabilité désirée [33]</i>	<i>51</i>
<i>Figure 2-10 Variation relatives moyennes du dosage en eau E et du nombre de chocs du test d'ouvrabilité C.E.S en fonction de l'affaissement [8].</i>	<i>52</i>
<i>Figure 3-1 Répartition des granulats du béton quaternaire.....</i>	<i>77</i>
<i>Figure 3-2 Valeur de l'affaissement cône d'Abrams</i>	<i>80</i>
<i>Figure 3-3 Masse volumique des bétons frais</i>	<i>81</i>
<i>Figure 3-4 Masse volumique à l'état durci.....</i>	<i>82</i>
<i>Figure 3-5 Résistance à la compression à 3,7 et 28jours.....</i>	<i>84</i>
<i>Figure 3-6 évaluations du cout de matériaux</i>	<i>87</i>

INTRODUCTION GENERALE

Le développement durable s'impose aujourd'hui comme une nécessité face aux nombreux défis environnementaux et sociaux. Le pays en pleine phase de reconstruction et de modernisation, connaît une forte croissance des besoins en infrastructure. Or la majorité de ces ouvrages : routes, bâtiments, pont reposent sur l'utilisation du béton comme matériau principal, dont le liant constitue un élément essentiel. Parmi les liants, le ciment Portland occupe une place capitale en raison de ses propriétés hydrauliques qui lui permettent de durcir en présence d'eau et de conférer au béton sa résistance mécanique. À l'échelle mondiale, sa consommation annuelle avoisine une tonne par personne, avec témoignage de son rôle central dans le développement des infrastructures, du logement et des ouvrages d'art. Cette omniprésence fait du béton un moteur essentiel de la croissance urbaine et économique à travers le monde [1].

Le mécanisme d'obtention du ciment Portland, surtout lors de l'étape de clinkérisation à haute température, consomme énormément d'énergie et rejette de grandes quantités de CO₂. À l'échelle mondiale, ce seul secteur représente environ 8 % des émissions de gaz à effet de serre. Plus précisément, la fabrication d'une tonne de clinker génère en moyenne 810 kg de CO₂. En République Démocratique du Congo, bien que sa part soit plus modeste (environ 13 % des émissions industrielles, soit 0,6 million de tonnes de CO₂ par an), son impact environnemental reste significatif dans le contexte local, en raison des émissions de CO₂ et de la pollution qu'il génère [2].

Le biocharbon, produit par la pyrolyse de biomasses résiduelles dans un environnement pauvre en oxygène, présente une structure poreuse et une capacité d'absorption d'eau intéressantes pour améliorer l'hydratation du ciment, la cure interne et potentiellement la résistance des bétons [3]. De plus, son incorporation peut contribuer à la séquestration du carbone et à la valorisation des déchets organiques, s'inscrivant dans une démarche d'économie circulaire. Plusieurs études ont mis en évidence que l'intégration de biocharbon à hauteur de 1 à 5 % permet non seulement

de réduire l'empreinte carbone du béton, mais aussi d'en améliorer ses propriétés mécaniques et sa perméabilité dont celui présenté par Xuqun Lin et al.

Cependant, les effets du biochar varient selon ses caractéristiques physico-chimiques. Tiefeng Chen et al soulignent notamment qu'une concentration excessive peut réduire la résistance du béton face aux cycles gel-dégel, d'où la nécessité d'une caractérisation préalable du biocharbon utilisé. Face à l'urbanisation croissante et aux enjeux environnementaux, l'étude vise à réduire les émissions de CO₂ liées à la production de ciment tout en valorisant des déchets de biomasse. Elle évalue l'impact du biocharbon sur les propriétés mécaniques et la durabilité du béton, dans une démarche d'économie circulaire.

Le problème central qui motive ce travail est l'impact environnemental significatif de l'industrie cimentière, principalement en termes d'émissions de dioxyde de carbone (CO₂). Ces émissions contribuent de manière significative au changement climatique, un défi global aux conséquences multiples et interconnectées. L'augmentation des concentrations de CO₂ dans l'atmosphère, due en grande partie aux activités humaines dont la production de ciment, est un facteur majeur du réchauffement climatique [4]. Ainsi, la nécessité de développer des alternatives au béton de ciment traditionnel, ou des méthodes de production de ciment à faible émission de CO₂, constitue une priorité pour atténuer l'impact environnemental du secteur de la construction et contribuer aux objectifs de développement durable et de lutte contre le changement climatique.

Cette recherche sera orientée par des questions suivantes :

- Quel est l'impact de l'ajout de biocharbon sur les propriétés mécaniques (résistance à la compression) et physiques des bétons utilisés en génie civil ?
- Quel pourcentage de substitution du ciment par le biocharbon permet de maintenir des propriétés mécaniques satisfaisantes des bétons, tout en optimisant leur capacité de séquestration de carbone ?
- Comment le bilan environnemental global d'un béton au biocharbon se compare-t-il à celui d'un béton conventionnel utilisé en génie civil ?

Pour anticiper les réponses aux questions de recherche, plusieurs hypothèses sont avancées :

- L'incorporation du biocharbon, en faible proportion, pourrait améliorer certaines propriétés de durabilité (réduction de la perméabilité, meilleure absorption capillaire) tout en affectant modérément les résistances mécaniques.
- A certain pourcentage de substitution, il est possible de maintenir des propriétés mécaniques acceptables tout en bénéficiant d'une séquestration significative de carbone.
- Les formulations de béton intégrant du biocharbon présenteraient un meilleur bilan environnemental que les formulations conventionnelles utilisées en génie civil.

La production de béton, via le coût élevé du ciment et son impact environnemental (émissions de CO₂), motive la recherche de solutions alternatives. Le biocharbon (valorisation de biomasse) est étudié comme substitut partiel pour réduire les coûts, minimiser l'empreinte carbone et potentiellement maintenir ou améliorer la résistance du béton.

Dans le contexte actuel de recherche sur les matériaux de construction durables, l'étude du biocharbon comme substitut au ciment est pertinente. Ce travail contribuera à la connaissance de son impact sur la résistance du béton, son efficacité économique en réduisant la quantité de ciment nécessaire, et son rôle dans la diminution de l'empreinte environnementale globale du béton. Le développement d'un béton intégrant du biocharbon répond à un triple enjeu sociétal ; la nécessité de constructions plus résistantes et durables, la pression économique pour optimiser les coûts des matériaux (notamment en réduisant l'utilisation du ciment), et l'urgence de minimiser l'impact environnemental du secteur de la construction pour un avenir plus durable.

L'objectif général de ce travail est de développer un béton à faible empreinte carbone par substitution partielle du ciment. Pour atteindre cet objectif, le travail se décline en plusieurs objectifs spécifiques suivant :

- ✓ Caractériser les matériaux de base (ciment, granulats et biocharbon) utilisés dans la formulation du béton ;
- ✓ Formuler des bétons à différents taux de substitution du ciment par le biocharbon selon la méthode de Dreux–Gorisse ;

- ✓ Analyser l'effet du biocharbon sur le comportement global du béton afin d'identifier un taux de substitution optimal permettant de réduire l'empreinte carbone sans compromettre les performances.

Le mémoire suivra une approche en trois étapes complémentaires. Il débutera par une approche documentaire, à travers une revue bibliographique permettant de rassembler les travaux scientifiques liés à la problématique, ainsi que les méthodes existantes. Cette étape visera notamment à analyser les impacts environnementaux de la production de ciment et à recenser les alternatives déjà explorées dans le monde. Ensuite, une phase expérimentale sera menée en laboratoire afin de formuler des bétons à partir de matériaux locaux intégrant une substitution partielle du ciment par du biocharbon, et d'en évaluer les performances en termes de résistance, de durabilité et d'empreinte carbone. Enfin, une analyse statistique des résultats permettra de comparer les formulations testées avec un béton conventionnel, d'en tirer des conclusions économiques et environnementales, et de formuler des propositions concrètes pour favoriser l'adoption de solutions plus durables dans le domaine de la construction.

Mis à part l'introduction générale et la conclusion générale ce mémoire est subdivisé en trois chapitres :

- Le Chapitre premier porte sur les Généralités sur le thème ;
- Le deuxième expose la Méthodologie et matériels de recherche ;
- Le chapitre trois dédié à la Présentations et analyse des résultats.

Chapitre 1

GENERALITES SUR LE THEME

1.1 INTRODUCTION

Le béton est un matériau composite obtenu par le mélange du ciment, de l'eau, du sable, des graviers et, au besoin, d'adjuvants. Il est principalement reconnu pour sa forte résistance à la compression, propriété qui le rend indispensable dans les ouvrages tels que les bâtiments, ponts, routes et barrages. Sa polyvalence, sa durabilité et sa capacité d'adaptation à de nombreux usages expliquent qu'il soit aujourd'hui l'un des matériaux les plus employés dans le domaine de la construction [5].

Le présent chapitre rassemble les notions essentielles relatives au béton. Il aborde la nature de ses constituants, les différents types existants, les classifications couramment utilisées, les méthodes de formulation, ainsi que les propriétés du matériau, tant au jeune âge qu'à l'état durci. Il présente également la notion de distribution granulaire, les principales pathologies rencontrées et les domaines d'utilisation du béton.

1.2 CONSTITUANT DU BETON

Les propriétés du béton dépendent directement de la qualité et de la combinaison de ses différents constituants. Le béton est un mélange de plusieurs composants : ciment, eau, sable, gravier et, le plus souvent, adjuvants qui constituent un ensemble homogène [6]. La répartition des constituants d'un béton ordinaire est illustrée dans la *figure 1-1*.

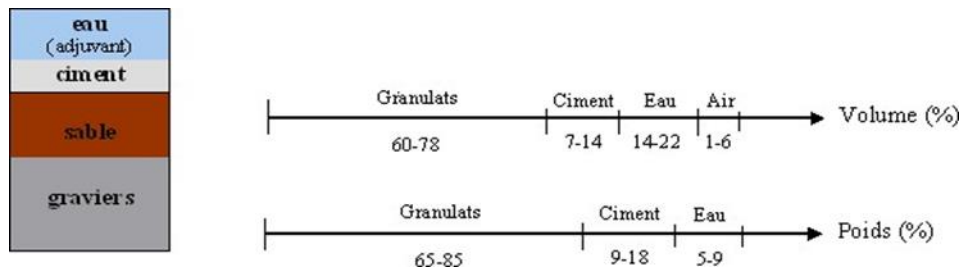


Figure 1-1 Constituents et ordre de grandeur des proportions d'un béton ordinaire [6]

Cette section présente successivement le ciment, les granulats, l'eau de gâchage et les adjuvants, éléments indispensables à la confection d'un béton performant.

1.2.1 Ciment

Le ciment est un liant hydraulique présenté sous forme de poudre minérale fine. Au contact de l'eau, il forme une pâte qui prend progressivement et durcit aussi bien à l'air qu'en immersion [7]. Ce durcissement résulte de l'hydratation de composés tels que les silicates et aluminates de calcium, dont la proportion en chaux (CaO) et en silice réactive (SiO₂) doit représenter au moins 50 % de la masse totale [8].

Ce liant constitue l'élément central du béton, car c'est lui qui permet au mélange de se transformer en un matériau solide et cohérent. Le choix du type de ciment et de sa quantité dépend de plusieurs critères : les performances mécaniques recherchées, les conditions environnementales, l'aspect souhaité ou encore la nature des granulats employés [9].

1.2.1.1 CONSTITUANT DU CIMENT

Les ciments usuels sont principalement composés de clinker, auquel peuvent être ajoutés divers constituants tels que le calcaire, le laitier de haut-fourneau, les cendres volantes, les pouzzolanes naturelles ou les fumées de silice. Ces additions permettent d'ajuster certaines propriétés du ciment pour répondre à des exigences spécifiques liées au type d'ouvrage ou aux conditions d'exposition [7].

a. Le clinker Portland (K)

Le clinker est produit par cuisson à haute température d'un mélange homogène de calcaire et d'argile. Il renferme majoritairement de la chaux, de la silice et de l'alumine. Après broyage avec une petite quantité de gypse, il donne naissance au ciment Portland [8].

Les principales phases minérales du clinker sont :

- le silicate tricalcique (C_3S) : 50 à 70 %
- le silicate bicalcique (C_2S) : 5 à 25 %
- l'aluminate tricalcique (C_3A) : 2 à 12 %
- l'alumino-ferrite tétracalcique (C_4AF) : 0 à 15 %

La proportion de ces phases conditionne le comportement du ciment. Par exemple, un ciment riche en C_3S et C_3A développera rapidement des résistances initiales, tandis qu'un ciment moins dosé en C_3A dégagera une chaleur d'hydratation plus faible, ce qui est préférable par temps chaud [8].

b. Le laitier granulé de haut-fourneau (S)

Le laitier est un sous-produit de la fabrication de la fonte. Refroidi brusquement, il devient un matériau hydraulique lorsqu'il est broyé. Sa composition chimique se rapproche de celle du clinker, avec une forte teneur en silice et en chaux. Toutefois, il retient moins bien l'eau de gâchage et exige une attention particulière pour éviter la dessiccation [10]

c. Les cendres volantes (V et W)

Les cendres volantes proviennent du dépoussiérage des gaz des centrales thermiques. Elles peuvent être :

- siliceuses (V) : propriétés pouzzolaniques, capables de fixer la chaux [8]
- calciques (W) : propriétés pouzzolaniques et hydrauliques

Les cendres siliceuses doivent contenir entre 40 et 55 % de silice réactive, tandis que les cendres calciques renferment une chaux réactive supérieure à 5 %.

d. Les pouzzolanes naturelles (Z)

Les pouzzolanes naturelles sont généralement Issues de roches volcaniques ou sédimentaires, Ils sont riches en silice réactive (≥ 25 %) et présentent une activité pouzzolanique naturelle [8].

e. Les schistes calcinés (T)

Obtenus par calcination autour de 800 °C, ils possèdent à la fois des propriétés pouzzolaniques et hydrauliques lorsqu'ils sont finement broyés. Ils sont aujourd'hui peu utilisés dans les fabrications courantes [7].

f. Les calcaires(L)

Les calcaires sont considérés comme un constituant à part entière du ciment, et non comme un ajout secondaire, dès lors qu'ils dépassent 5 % de la masse totale du ciment. Ils doivent pour cela contenir plus de 75 % de carbonate de calcium (CaCO₃), présenter une quantité d'argile suffisamment faible pour que l'indice au bleu de méthylène n'excède pas 1,20 g pour 100 g de matériau, et avoir une teneur en matières organiques (TOC) ne dépassant pas 0,5 % [7].

g. Les fumées de silice (D)

Les fumées de silice sont des particules extrêmement fines, environ cent fois plus petites qu'un grain de ciment. Ayant un diamètre moyen de l'ordre de 1/10 de micron, elles présentent des propriétés pouzzolaniques dues à leur forte teneur en silice amorphe ($\geq 85\%$). En raison de leur finesse, elles complètent aussi la granulométrie des ciments. Elles améliorent la compacité et les résistances mécaniques du béton [10].

1.2.1.2 Types de ciments courants

a. Types de ciments selon leur résistance normale

La qualité d'un ciment se détermine principalement par sa résistance mécanique à 28 jours. Sur cette base, trois classes principales ont été définies, correspondant aux valeurs 32,5 ; 42,5 et 52,5 Mpa. Les sous classes « R » ont été introduites pour ces catégories afin d'identifier les ciments dont les résistances au jeune âge sont élevées [7]. Les performances mécaniques et physiques attendues des ciments sont résumées dans le *tableau 1.1*.

Tableau 1-1 spécification mécaniques et physiques des ciments [7]

Classe	Résistance à la compression (Mpa)				Retrait à 28 jours ($\mu\text{m/m}$)	Début de prise (min)	Stabilité (mm)
	Au jeune âge		à 28 jours				
	2 jours	7 jours	Min	Max			
32,5	-	-	≥ 32.5	≤ 52.5	≤ 800	≥ 90	≤ 10
32,5R	$\geq 13,5$	-			≤ 1000		

42,5	≥ 12.5	-	≥ 42.5	≤ 62.5		≥ 60
42,5R	≥ 20	-				
52	≥ 20	-	≥ 52.5	-	-	
52,5R	≥ 30	-				

b. Types de ciments selon leurs constituants

Selon que des constituants, autres que le gypse, sont ou non ajoutés au clinkers lors des opérations de fabrications, on obtient les différents types de ciments définis par la norme. Le tableau ci-dessous donne la liste de différents types de ciments courants normalisés avec indication, pour chacun d'eux, de leur désignation propre et des pourcentages respectifs de constituants qu'ils comportent [8]. La classification des ciments usuels selon les normes en vigueur est présentée dans le *tableau 1-2*.

Tableau 1-2 différents types de ciments courants normalisés avec indication [8]

Désignations	Type de ciments	Teneur en clinker	Teneur en % de l'un des constituants suivants : Laitier-pouzzolanes- cendres-calcaires- schistesfumées de silice	Teneur en constituants secondaires
CPA-CEM I	Ciment Portland	95 à 100%		0 à 5%
CPJ-CEM II/A	Ciment Portland composé	80 à 94%	-De 6 à 20% de l'un quelconque constituant, sauf dans les cas où le constituant est des fumées de silice auquel cas la proportion est limitée à 10% (*);	0 à 5%
CPJ-CEM II/B		65 à 79%	-De 21 à 35% avec les mêmes restrictions que ci-dessus (*).	0 à 5%

CHF-CEM III/A	Ciment de haut fourneau	35 à 64%	-36 à 65% de laitier de haut fourneau	0 à 5%
CHF-CEM III/B		20 à 34%	-66 à 80% de laitier de haut fourneau	0 à 5%
CLK-CEM III/C		5 à 19%	- 81 à 95% de laitier de haut fourneau	0 à 5%
CPZ-CEM IV/A	Ciment pouzzolanique	65 à 90%	-10 à 35% de pouzzolanes, cendres siliceuses ou fumées de silice, ces dernières étant limitées à 10% ;	0 à 5%
CPZ-CEM IV/B		45 à 64%	-36 à 55% comme ci-dessus.	0 à 5%
CLC-CEM V/A	Ciment au laitier et aux cendres	40 à 64%	-18 à 30% de laitier de haut fourneau et 18 à 30% de cendres siliceuses ou de pouzzolanes.	0 à 5%
CLC-CEM V/B		20 à 39%	-31 à 50% de chacun des 2 constituants comme ci-dessus	0 à 5%

(*) Le pourcentage de filler est limité à 5%.

1.2.2 Granulats

Les granulats sont des matériaux inertes, constitués de sables, de graviers ou de cailloux, entrant dans la composition des bétons. Ils regroupent l'ensemble de grains dont la dimension est comprise entre 0 et 125mm, et peuvent être d'origine naturelle, littératurée ancienne, est aujourd'hui considéré comme impropre. Les granulats destinés à la confection du béton doivent satisfaire aux exigences de la norme XP P 18-540, qui les classe en catégories A et D selon de qualité et de performance décroissantes, la catégorie A correspondant aux granulats les plus

adaptés aux bétons exigeants et la catégorie D aux moins performants. Cette classification constitue un outil d'aide au choix des matériaux en fonction des exigences de résistance et durabilité recherchées [8].

D'un point de vue fonctionnel, les granulats constituent la fraction inerte du béton et jouent un rôle déterminant dans l'obtention de performances mécaniques satisfaisantes, d'une durabilité adéquate et d'une ouvrabilité maîtrisée, tout en contribuant à l'optimisation des coûts de production. Leur sélection doit ainsi privilégier des matériaux propres, résistants et chimiquement stables, présentant une granulométrie continue et exempts d'impuretés susceptibles d'altérer les propriétés du béton [8].

Pour la formulation du béton, deux facteurs ont longtemps été considérés comme ayant une influence sur les propriétés du béton :

- ✓ La proportion relative gravillons/sable traduite par le facteur G/S ;
- ✓ La granulométrie du sable caractérisée, par exemple, par son module de finesse. Le module de finesse d'un sable pour béton est généralement compris entre 2,2 et 2,8.

1.2.2.1 Granularité

La granularité des granulats reflète la répartition des tailles de grains et joue un rôle clé dans la structure du béton. Une distribution continue, où les grains fins viennent combler les vides laissés par les grains plus gros, associée à un rapport gravillon/sable judicieusement choisi, permet d'atteindre une compacité optimale, tout en améliorant l'ouvrabilité et les performances mécaniques du matériau.

1.2.2.2 Classifications de granulats selon la provenance

Les granulats sont des matériaux minéraux solides utilisés dans la fabrication du béton. Ils sont constitués de grains de tailles variées, généralement comprises entre 0 et 80 mm, et peuvent provenir de roches naturelles, de procédés industriels ou du recyclage de matériaux existants.

Dans un béton, les granulats occupent la plus grande partie du volume et influencent fortement sa résistance, sa durabilité et son coût de production [11].

Les granulats peuvent être classés en granulats naturels, granulats artificiels ou spéciaux et granulats recyclés. Cette distinction permet de mieux adapter leur utilisation aux exigences du béton [11].

a. Granulats naturels

Ils sont largement utilisés dans la construction en raison de leur disponibilité et de leurs bonnes propriétés. Les granulats naturels sont faits des granulats roulés et des granulats concassés.

- **Granulats roulés** : Ces granulats se forment naturellement par l'action de l'eau, du vent ou du gel sur les roches. Au fil du temps, les grains deviennent arrondis et lisses. On les trouve principalement dans les rivières, les zones marines et les dunes. Leur forme facilite le malaxage et la mise en place du béton, mais leur surface lisse limite légèrement leur adhérence au ciment [11].
- **Granulats concassés** : Ils sont obtenus par le broyage de roches dures telles que le granite, le basalte ou le calcaire. Ils présentent des formes anguleuses, ce qui améliore l'accrochage avec la pâte de ciment et permet d'obtenir des bétons plus résistants. Un nettoyage est souvent nécessaire pour éliminer les fines particules pouvant nuire à la qualité du béton [11].

b. Granulats artificiels et spéciaux

Les granulats artificiels et spéciaux proviennent de procédés industriels ou de sous-produits de certaines industries. Ils sont utilisés lorsque des propriétés particulières sont recherchées [7].

- **Granulats de laitier** : Le laitier issu des hauts fourneaux, après refroidissement et traitement, peut être utilisé comme granulats. Il présente des caractéristiques proches de celles des roches naturelles et peut être incorporé dans certains bétons [8].
- **Granulats légers** : Ces granulats sont fabriqués à partir de matériaux expansés comme les argiles expansées, la perlite ou la vermiculite. Leur faible poids permet de produire des bétons légers, utiles pour réduire les charges sur les structures [8].

- **Granulats spéciaux** : Certains granulats sont destinés à des usages bien précis, par exemple pour les bétons résistants à de très hautes températures ou pour les bétons lourds. Ils sont choisis en fonction des performances spécifiques recherchées [8].

c. Granulats recyclés

Les granulats recyclés proviennent du traitement de matériaux issus de la démolition de bâtiments ou d'ouvrages. Après concassage et tri, ils peuvent être réutilisés dans le béton. Cette pratique permet de réduire la consommation de ressources naturelles, tout en respectant des critères de qualité stricts [11].

1.2.2.3 Classification des granulats selon la masse volumique

Les granulats peuvent aussi être distingués selon leur masse volumique réelle : les granulats légers, dont la masse volumique est inférieure à 2 g/cm^3 ; les granulats courants, dont la masse volumique se situe entre 2 et 3 g/cm^3 ; les granulats lourds, dont la masse volumique dépasse 3 g/cm^3 . Dans la plupart des ouvrages de bâtiment et de génie civil, les granulats utilisés appartiennent à la catégorie des granulats courants, car ils offrent un bon équilibre entre résistance, durabilité et coût [11].

1.2.2.4 Classifications selon la grosseur

Selon leurs dimensions extrêmes d et D on distingue cinq classes granulaires principales préconisée par la norme (NF EN 933-2) :

- Les fines : $0/d$ avec $d \leq 0,08 \text{ mm}$;
- Les sables : $0/D$ avec $D \leq 6,3 \text{ mm}$;
- Les gravillons : d/D avec $d \geq 2 \text{ mm}$ et $D \leq 31,5 \text{ mm}$;
- Les cailloux d/D avec $d \geq 20 \text{ mm}$ et $D \leq 80 \text{ mm}$;
- Les graves $0/D$ avec $6,3 \text{ mm} < D \leq 80 \text{ mm}$.

La détermination des valeurs de d et D des classes granulaires d/D se fait en considérant que les granulats correspondant à ces dimensions doivent être présents en proportions suffisantes.

La résistance mécanique des granulats peut s'exprimer par des résistances mécaniques à la fragmentation, à l'usure et au polissage. Elle est donc fonction des caractéristiques intrinsèques de la roche d'origine.

Le classement des granulats se fait par criblage. Lorsque l'on est en présence d'un sable pauvre en éléments fins de granularité constante (à l'exemple des sables de certains cours d'eau), on peut le corriger en y ajoutant un sable fin, soit naturels à grains ronds, soit broyé en proportion convenable pour obtenir un sable composite de granularité admissible. Il ne faudrait pas confondre la granularité, l'ensemble des caractéristiques définissant l'état granulaire d'un produit, de la granulométrie qui est la mesure des dimensions des grains ou fragments.

En présence d'un sable très hétérogène, tantôt pauvre en éléments fins, tantôt excédentaire, la solution consiste à procéder à une coupure interne, à une maille judicieusement choisie, généralement comprise entre 0,4 et 0,8 mm. On obtient ainsi deux sables, un sable fin et un gros sable, qui correctement dosés lors de la fabrication du béton, permettent d'obtenir un sable composite acceptable [11].

1.2.2.5 Désignations de granulats

Les granulats sont souvent désignés en fonction de leur plus petite et leur plus grande dimension comme suit : **Granulat d/D** Où :

- **Granulat** : sable ou gravier ;
- **d** : dimension minimale des grains ;
- **D** : dimension maximale des grains

Avec une tolérance de 15% d'élément $< d$ et 15% d'élément $> D$ si $D > 1.58d$ et une tolérance de 20% si $D < 1.58d$ [11].

1.2.3 Eau de gâchage

Les caractéristiques de l'eau de gâchage sont normalisées par les normes NF P 18-303 de 1941 et NF EN 1008. [12]

L'eau de gâchage représente un constituant fondamental du béton, au même titre que le ciment et les granulats [8]. Elle joue un rôle essentiel dans l'hydratation du ciment, processus indispensable au développement de la résistance mécanique du matériau, tout en conférant au béton la plasticité et l'ouvrabilité nécessaires pour son moulage et sa mise en œuvre efficace [13]. La quantité d'eau utilisée influe directement sur la durabilité et les performances mécaniques du béton : un excès peut provoquer une diminution significative de sa résistance et de sa longévité [8]. L'eau employée doit être exempte d'impuretés nocives, notamment matière organique, sulfates, chlorures, ions métalliques, huiles, sucres, argiles, algues ou détergents, afin de garantir la qualité du béton [13]. L'eau potable constitue la norme de référence pour le gâchage, tandis que les autres sources d'eaux souterraines, de surface, recyclées ou de rejet industriel nécessitent des analyses et essais préalables pour évaluer leur aptitude. L'utilisation de l'eau de mer est strictement limitée aux bétons non armés [13].

Le rapport eau/ciment (E/C) constitue un paramètre déterminant de la qualité du béton, conditionnant à la fois sa résistance finale et son ouvrabilité. Il varie généralement entre 0,4 pour les bétons de haute qualité et 0,6 pour les bétons de fondation, reflétant l'équilibre nécessaire entre consistance, maniabilité et performance mécanique [8].

1.2.4 Adjuvants

Un adjuvant est une substance incorporée au béton ou au mortier lors du malaxage, en faible proportion par rapport à la masse du ciment, afin de modifier ou d'améliorer certaines propriétés du matériau à l'état frais et/ou durci, sans en modifier la composition de base constituée du ciment, de l'eau et des granulats [8]. Les adjuvants sont généralement utilisés à des dosages inférieurs à 5 % de la masse du ciment, leur efficacité reposant sur leur action spécifique plutôt que sur leur quantité [14].

L'adjuvantation influence le comportement du béton à l'état frais, notamment sa mise en œuvre et son ouvrabilité, et peut également avoir une incidence sur les performances mécaniques et la durabilité du matériau à l'état durci. Un dosage inadapté peut entraîner des effets indésirables tels que des variations excessives du temps de prise ou une baisse des résistances mécaniques, ce qui impose une maîtrise rigoureuse de leur emploi [8].

Les plastifiants et super plastifiants sont principalement utilisés pour améliorer l'ouvrabilité sans augmentation de la teneur en eau ; leurs dosages se situent généralement entre 0,2 % et 1,5 % de la masse du ciment, pouvant atteindre 2 % selon les formulations et les recommandations du fabricant [8]. Les accélérateurs et retardateurs de prise sont employés à des teneurs comprises entre 0,1 % et 1 %, afin d'adapter le béton aux conditions climatiques ou aux contraintes spécifiques du chantier. Les entraîneurs d'air, destinés à améliorer la durabilité du béton, notamment vis-à-vis des cycles gel-dégel, sont introduits à des dosages très faibles, généralement inférieurs à 0,1 % de la masse du ciment [14].

L'utilisation maîtrisée des adjuvants permet ainsi d'optimiser la mise en place du béton, de limiter les défauts de surface tels que le faïençage, de faciliter le coulage dans des zones difficiles d'accès et d'adapter le matériau à des usages structurels, esthétiques ou environnementaux, sans modification significative de sa composition de base [8]. Enfin, les adjuvants doivent satisfaire aux exigences des normes en vigueur et porter les marquages CE et NF, garantissant leur qualité, leur conformité et leur aptitude à l'emploi dans les ouvrages en béton [15].

1.3 TYPOLOGIE DE BETON [11]

Selon les propriétés recherchées, le type de liant utilisé, l'usage destiné au béton, il existe plusieurs types des bétons parmi lesquelles nous pouvons citer le béton ordinaire qui fait l'objet de cette étude, le béton précontraint, le béton auto plaçant, le béton à haute performance, le béton à très haute performance, etc.

1.3.1 Béton ordinaire

Le béton ordinaire est un matériau de construction composé de ciment, d'eau, de granulats et éventuellement d'adjuvants. Il est largement utilisé pour sa résistance à la compression et sa facilité de mise en œuvre dans des applications telles que les fondations, dalles et structures diverses.

1.3.2 Béton précontraint

Le béton précontraint est une forme de béton utilisée dans la construction. Il est sensiblement « Précontraint » (comprimé) pendant la production, d'une manière qui le renforce contre les forces de traction qui existeront en service. Cette compression est produite par la mise sous tension de « tendons » à haute résistance situés à l'intérieur ou à côté du béton et est effectuée pour améliorer les performances du béton en service.

1.3.3 Béton auto plaçant

Le béton auto plaçant est un béton de ciment capable, sous le seul effet de la pesanteur, de se mettre en place dans les coffrages même les plus complexes et très encombrés sans nécessiter pour autant des moyens de vibration afin de consolider le mélange avec comme résultat un produit très homogène.

1.3.4 Béton à haute performance

Un béton à haute performance (BHP) est un béton caractérisé par une très forte résistance à la compression, puisque celle-ci est supérieure à 50 MPa à 28 jours, et des propriétés exceptionnelles à l'état frais (notamment en termes de viscosité), à court ou à long terme.

1.3.5 Béton à très haute performance

Les micro silices ou autres micros fines permettent au BTHP d'atteindre des résistances caractéristiques à la compression supérieure à 100MPa.

1.4 CLASSIFICATION DES BÉTONS [11]

La classification des bétons se fait principalement selon plusieurs critères, notamment la masse volumique, la résistance, le liant utilisé, la destination, etc.

1.4.1 Classification des bétons selon la masse volumique

Suivant la masse volumique du béton, on distingue le béton très lourd (extra lourd), le béton lourd, le béton léger et le béton très léger. Le *Tableau 1-3* présente la classification des bétons selon les masses volumiques.

Tableau 1-3 classification selon la masse volumique [11]

Classification	Masse volumique
Béton très lourd	$\geq 2,5 \text{ g/cm}^3$
Béton lourd	$1,8 \text{ g/cm}^3 \leq \rho \leq 2,5 \text{ g/cm}^3$
Béton léger	$0,5 \text{ g/cm}^3 \leq \rho \leq 1,8 \text{ g/cm}^3$
Béton très léger	$\leq 0,5 \text{ g/cm}^3$

Les bétons extra lourds sont formés de ciment et d'agrégats spéciaux à masse volumique élevée. Ils sont utilisés souvent pour la protection contre les rayons radioactifs. Les bétons lourds sont formés des ciments et agrégats compacts ordinaires. Les bétons légers sont formés de ciment et d'agrégats poreux naturels ou artificiels.

1.4.2 Classification des bétons selon leur résistance

Afin de classer le béton selon la résistance, on réalise des essais à la compression des éprouvettes cylindriques de dimension (11 x 22 ; 16 x 32 ; 25 x 50). Les dimensions sont centimètres. Le moule le plus utilisé est le moule 16 x 32. Outre les moules cylindriques, les essais peuvent également se passer sur les moules cubiques. La résistance à la compression d'un béton est exprimée par la résistance caractéristique notée f_{ck} . La norme ENV 206 classe les bétons en fonction de leurs résistances caractéristiques à la compression qui sont détaillées dans le *tableau 1-4*.

Tableau 1-4 Classes des bétons selon la résistance [11]

Classe	C12/15	C16/20	C20/25	C25/30
f _{ck} , Cyl (Mpa)	12	16	20	25
f _{ck} , cube (Mpa)	15	20	25	30

Dans ce *Tableau 1-4*, $f_{ck, Cyl}$ est la résistance caractéristique mesurée sur les éprouvettes cylindriques, $f_{ck, cube}$ est la résistance caractéristique mesurée sur des éprouvettes cubiques.

1.4.3 Classification des bétons selon la destination

Selon la destination du béton, on distingue :

- ✦ Le béton ordinaire (pour les éléments de construction porteurs : poteaux, dalles, poutres, etc.)
- ✦ Les bétons hydrotechniques (pour les barrages, écluses, revêtement des canaux) ;
- ✦ Les bétons pour les planchers légers (couverture et fondations des chaussées, etc.).
- ✦ Etc.

1.4.4 Classification des bétons selon le genre de liant utilisé [16]

Selon la nature du liant utilisé, les bétons peuvent être classés en différentes catégories, chaque type présentant des caractéristiques et des domaines d'application spécifiques.

- ✓ **Bétons à liants hydrauliques**, également appelés bétons de ciment, sont élaborés à partir de liants tels que le ciment Portland et sont principalement utilisés dans les ouvrages de bâtiment et de génie civil en raison de leurs bonnes performances mécaniques et de leur durabilité.
- ✓ **Bétons à liants organiques**, dont le béton bitumineux constitue l'exemple le plus courant, utilisent le bitume comme liant et sont essentiellement employés pour les revêtements routiers et les infrastructures de transport.

1.5 MÉTHODES DE FORMULATION DES BÉTONS

L'étude de la formulation du béton consiste à déterminer une combinaison optimale des granulats disponibles, ainsi que les dosages appropriés en ciment et en eau, afin d'obtenir un béton répondant aux exigences mécaniques, de mise en œuvre et de durabilité de l'ouvrage considéré. Cette démarche vise à assurer un compromis entre performances techniques,

économie des matériaux et conditions de chantier. Les différentes méthodes de formulation conduisent soit à des dosages volumétriques, soit de préférence à des dosages pondéraux, le passage de l'un à l'autre étant possible à partir de la connaissance de la masse volumique apparente des granulats en vrac [8].

1.5.1 Méthode de DREUX-GORISSE

La méthode de Dreux-Gorisse constitue une approche pratique largement utilisée pour la formulation des bétons courants. Elle repose sur des hypothèses simplificatrices permettant d'aboutir rapidement à une composition initiale du béton, laquelle doit ensuite être ajustée par des essais expérimentaux. Les paramètres principaux pris en compte sont la résistance à la compression à 28 jours, la maniabilité recherchée et la dimension maximale des granulats.

Cette méthode s'applique aux bétons présentant des résistances comprises entre 15 MPa et 40 MPa. La consistance du béton est choisie en fonction des caractéristiques de l'ouvrage et des conditions de mise en œuvre, et elle est évaluée à l'aide de l'essai au cône d'Abrams, conformément aux pratiques normalisées [14].

1.5.2 Méthode de BOLOMEY [11]

En 1925, Bolomey propose une courbe granulométrique continue de référence incluant le ciment. Par la formule (1.1), on trace une courbe granulométrique de référence et on s'efforce de réaliser avec des granulats dont on dispose une composition granulaire totale (ciment compris), dont la courbe soit aussi proche que possible de la courbe de référence théorique.

$$P = A + (100 - A) \times \sqrt{\frac{d}{D}} \quad (1.1)$$

Avec :

- P : le pourcentage de grains passant à la passoire de diamètre d,
- D : est le diamètre du plus gros grain,

- A : varie de 8 à 16, sa valeur étant d'autant plus élevée que le dosage en ciment est plus fort.

Cette méthode aboutit théoriquement tout au moins à une granularité continue.

1.5.3 Méthode de FULLER-THOMPSON [11]

En 1907, Fuller et Thompson basent aussi leur méthode sur une compacité maximale mais sur un mélange à granulométrie continue. L'aspect novateur de la méthode se situe dans la prise en compte du ciment mais aussi des dimensions extrêmes des grains d (plus petite dimension) et D (plus grande dimension). En revanche, la forme des grains n'intervient pas dans la méthode.

La loi de Fuller est exprimée par la relation suivante :

$$P_{fuller\ Thompson} = \frac{100 \times 5\sqrt{d}}{D} \quad (1.2)$$

Avec :

- d : plus petite dimension ;
- D : plus grande dimension.
- P : le pourcentage massique

1.5.4 Méthode de Faury [12]

Cette méthode est venue en 1941 compléter la méthode de Bolomey. La méthode de Faury donne des bétons comportant moins de sable et plus de gravier. Ces bétons sont plus raides et conviendront à des travaux pour lesquels une très bonne maniabilité n'est pas indispensable. Les bétons Faury auront souvent une résistance mécanique supérieure aux bétons Bolomey correspondants. Cette méthode présente des particularités du fait qu'elle est applicable à tous les granulats, quelle qu'en soit leur masse volumique. Faury étudie l'effet des vides, vides qui varient avec $\sqrt[5]{D}$. Pour tenir compte de l'effet du coffrage et des armatures, Faury introduit la notion d'effet de paroi et du Rayon moyen du moule. L'effet de paroi est déterminé à l'aide de la relation 1.3 et le rayon moyen du moule par la relation 1.4.

❖ Effet de paroi

$$Ep = \frac{D}{R} \quad (1.3)$$

Avec :

- Ep : épaisseur moyenne de pâte entourant les granulats
- D : diamètre caractéristique des granulats
- R : rayon moyen

❖ Rayon moyenne du moule

$$R = \frac{Vb - Va}{Sc + Sa} \quad (1.4)$$

Avec :

- Vb : volume total de béton dans le moule (m³)
- Va : volume des armatures(aciers)
- Sc : surface du coffrage en contact avec le béton(m²)
- Sa : surface des armatures en contact avec le béton(m²)
- R : rayon moyenne

1.5.5 Méthode de BARON-OLIVIER [11]

Dans cette méthode, il s'agit de déterminer une composition de béton répondant à des caractéristiques précises de résistance et d'ouvrabilité à partir des principes énoncés par BARON. C'est à partir des études expérimentales qu'il a réalisées dans les années 1970-80 et qui ont été optimisées par la suite en utilisant les directives de la norme NF P 18305, remplacée par la norme Européenne EN 206-1.

Les expériences ont confirmé les travaux réalisés par BOLOMEY et FAURY dont certaines formules ont été retenues en ce qui concerne les dosages en liant et en eau. Pour les dosages en granulats ce sont, en partie, les travaux de DREUX qui ont été retenus. L'ensemble est

complété par des résultats expérimentaux qui rendent la méthode aussi abordable que la méthode de DREUX sans avoir les inconvénients de sa limitation aux seuls bétons courants. Le problème du dosage optimal d'un béton n'est pas unique : il y a en fait deux problèmes qui peuvent être traités indépendamment l'un de l'autre :

- La définition de la pâte liante,
- La définition du squelette granulaire.

1.6 PROPRIETE DU BETON

Le béton présente deux comportements distincts : à l'état frais et à l'état durci. La connaissance de ces propriétés est indispensable pour assurer une conception et une utilisation adéquates du matériau.

1.6.1 Propriétés à l'état frais

La propriété essentielle du béton à l'état frais est son ouvrabilité, qui traduit son aptitude à être mis en place, à remplir les coffrages et à enrober correctement les armatures. Elle dépend de plusieurs facteurs, notamment le dosage en eau et en ciment, la granulométrie, la forme des granulats et l'utilisation éventuelle d'adjuvants.

Un excès d'eau, bien qu'améliorant temporairement l'ouvrabilité, entraîne une diminution de la compacité, des résistances mécaniques et favorise le phénomène de ressuage. La consistance du béton est généralement mesurée par l'essai d'affaissement au cône d'Abrams, conformément à la norme NF EN 12350-2 [17].

1.6.2 Propriétés à l'état durci

Le béton à l'état durci se caractérise principalement par sa résistance mécanique, notamment à la compression, qui évalue sa capacité à supporter des charges réduisant son volume. Cette propriété est mesurée sur des éprouvettes normalisées à 28 jours [8]. Si la compression est élevée, la traction et la flexion restent plus faibles. La résistance et l'ouvrabilité sont interdépendantes : un béton dense et résistant peut être moins maniable, tandis qu'un béton

fluide peut présenter une légère baisse de performance. Les bétons courants affichent des résistances comprises entre 20 et 40 MPa pour un rapport E/C $\approx 0,5$, tandis que les bétons à haute performance dépassent 40 MPa.

D'autres facteurs influencent la durabilité du béton durci, tels que la masse volumique, la porosité et le murissement sous humidité contrôlée, qui assurent une hydratation complète et renforcent la stabilité du matériau dans le temps [14]. L'ensemble de ces paramètres souligne l'importance d'un équilibre optimal entre formulation, compacité et dosage pour garantir performance, mise en œuvre et longévité du béton.

1.6.2.1 Cure humide

Le développement des résistances du béton dépend étroitement des conditions de cure. Une humidité relative supérieure ou égale à 80 % permet la poursuite de l'hydratation du ciment tant que des grains non hydratés subsistent. Une cure insuffisante peut interrompre ce processus, d'où la nécessité d'assurer un mûrissement continu du béton dès son jeune âge [18].

1.6.2.2 Résistance à la compression

La résistance à la compression dépend principalement du type et du dosage en ciment, du rapport eau/ciment et de la porosité du béton. Elle est mesurée par un essai de compression uni axiale sur éprouvettes normalisées, la valeur à 28 jours étant retenue par convention normative [17].

1.6.2.3 Masse volumique et porosité

La masse volumique du béton durci dépend de la nature et de la proportion des constituants, ainsi que de la quantité d'air emprisonné. La porosité, définie comme le rapport du volume des vides au volume total, constitue un paramètre déterminant de la durabilité. Sa réduction passe par une formulation adaptée, une compacité élevée du béton frais et un choix judicieux du type et du dosage en ciment [17].

1.7 PATHOLOGIES DU BETON

Le béton est exposé à différents phénomènes climatiques, chimiques et mécaniques qui peuvent provoquer des dégradations. Ces dégradations, appelées pathologies du béton, peuvent affecter la solidité, la durabilité et la sécurité des ouvrages. Elles apparaissent le plus souvent à cause d'une mauvaise formulation du béton, de conditions environnementales agressives ou d'erreurs lors de la mise en œuvre. De manière générale, les pathologies du béton se divisent en deux grandes catégories : les pathologies physico-chimiques et les pathologies mécaniques [12].

1.7.1 Pathologies physico-chimiques [12]

- **Carbonatation** est un phénomène lent au cours duquel le dioxyde de carbone présent dans l'air réagit avec certains composés du ciment hydraté. Cette réaction entraîne une baisse du pH du béton, ce qui favorise la corrosion des armatures. Elle se manifeste par des fissures, un gonflement du béton et parfois son éclatement.

Prévention : utiliser des bétons denses et peu poreux, ainsi que des ciments contenant peu de pentlandite, comme les ciments au laitier ou aux cendres volantes.

- **Attaque par les ions chlorures** : Les ions chlorures peuvent pénétrer dans le béton à travers ses pores et atteindre les armatures, provoquant leur corrosion. Les signes visibles sont des fissures, des éclatements localisés du béton et des taches de rouille en surface.

Prévention et réparation : employer un béton compact à faible rapport eau/ciment, respecter l'épaisseur d'enrobage des armatures et utiliser des matériaux adaptés. Les réparations peuvent nécessiter le nettoyage des aciers et l'application de mortiers spécifiques.

- **Réaction alcali-granulat** : Cette pathologie résulte d'une réaction entre certains granulats et les alcalins du ciment. Elle provoque un gonflement interne du béton accompagné de fissures multiples, pouvant affaiblir la structure.

Prévention : limiter la teneur en alcalins du béton et choisir des granulats compatibles.

- **Réaction sulfatique** interne apparaît lorsque le béton est soumis à des températures élevées à un jeune âge, notamment dans la préfabrication. Elle entraîne des fissures et des déformations similaires à celles de l'alcali-réaction.

Prévention : contrôler la température du béton frais et utiliser des ciments peu exothermiques.

- **Gel et dégel** : Les cycles répétés de gel et de dégel fragilisent le béton lorsque l'eau contenue dans ses pores gèle et augmente de volume. Cela provoque des fissures internes et un écaillage en surface.

Prévention : utiliser des granulats résistants au gel et incorporer des entraîneurs d'air.

1.7.2 Pathologies mécaniques [12]

A. Désordres liés aux surcharges

Lorsque les charges appliquées dépassent celles prévues lors du dimensionnement, le béton peut se fissurer ou se déformer. Ces désordres sont souvent dus à une mauvaise conception ou à une exécution incorrecte.

Traitement : renforcement de la structure par ajout d'armatures ou réparation des zones endommagées.

B. Désordres liés aux sinistres

Les incendies, les inondations ou les catastrophes naturelles peuvent altérer gravement le béton, entraînant une perte de résistance et des fissures importantes.

Traitement : remplacement des parties dégradées et renforcement de l'ouvrage.

En bref, la meilleure façon de limiter les pathologies du béton consiste à agir dès la conception, en choisissant des matériaux adaptés, une bonne formulation et une mise en œuvre conforme aux règles de l'art. Une prévention efficace permet d'assurer la durabilité et la sécurité des ouvrages en béton.

1.8 ADDITIFS DANS LE BETON

L'utilisation des additifs dans le béton constitue aujourd'hui un levier fondamental pour optimiser ses performances mécaniques, physiques et environnementales [14]. Les plastifiants et superplastifiants, par exemple, améliorent l'ouvrabilité tout en réduisant le rapport

eau/ciment, tandis que les accélérateurs et retardateurs de prise permettent d'ajuster le durcissement aux conditions de mise en œuvre. Les additions minérales, telles que les cendres volantes, la fumée de silice, les scories granulées de haut fourneau ou le métakaolin, densifient la matrice cimentaire et renforcent la durabilité.

Dans une perspective de construction durable, l'attention se tourne vers des matériaux recyclés ou issus de ressources renouvelables. Le verre broyé, obtenu à partir de déchets post-consommation, peut remplacer partiellement le sable ou les granulats fins, contribuant à la valorisation des déchets tout en améliorant certaines propriétés mécaniques et esthétiques du béton [19]. Le biocharbon issu de la pyrolyse de biomasses végétales apparaît comme un additif prometteur. Sa structure poreuse et sa surface spécifique élevée permettent de retenir l'eau de gâchage et de la restituer progressivement, soutenant l'hydratation du ciment et améliorant la durabilité, même dans des formulations à faible rapport eau/ciment [20].

L'incorporation maîtrisée de ces matériaux améliore la microstructure, limite la connectivité des pores et freine la pénétration d'agents agressifs. Au-delà des aspects techniques, ils contribuent au stockage durable du carbone biogénique et à la valorisation des ressources locales, réduisant l'empreinte carbone globale du béton [21].

Toutefois, leur efficacité dépend étroitement du dosage et des caractéristiques physico-chimiques : un usage inadapté peut nuire aux performances ou accroître la consommation d'eau. Une approche expérimentale rigoureuse demeure donc indispensable pour atteindre un compromis optimal entre performance, durabilité et bénéfices environnementaux, confirmant le potentiel des additifs innovants et recyclés dans la construction durable [22].

1.9 DOMAINES D'UTILISATION DU BETON

Le béton, de par ses propriétés mécaniques et physiques remarquables, est devenu un matériau de construction universel capable de répondre aux exigences les plus diverses en termes de sécurité, de durabilité, d'inertie thermique et acoustique, de tenue au feu et d'esthétique. Cette polyvalence lui permet d'être largement utilisé dans quasiment tous les domaines du bâtiment et des travaux publics [23].

1.9.1 Béton dans le bâtiment

Dans le secteur du bâtiment, le béton joue un rôle central dans les constructions de toutes natures. Il est employé aussi bien dans les logements et bâtiments résidentiels que dans les bâtiments publics (écoles, hôpitaux, centres culturels), les bâtiments professionnels (bureaux, commerces, ateliers) et les bâtiments industriels. Cette présence généralisée s'explique par la capacité du béton à satisfaire les exigences essentielles du gros œuvre : structure, planchers, enveloppe et couverture [23].

Sa malléabilité à l'état frais permet de réaliser des formes architecturales variées, tout en assurant une bonne résistance mécanique et une durabilité exceptionnelle. De plus, la possibilité d'incorporer des adjuvants, fibres ou pigments ouvre des perspectives esthétiques et fonctionnelles supplémentaires, ce qui rend ce matériau attractif pour des applications modernes et innovantes (béton autoplaçant, béton léger, béton coloré).

1.9.2 Béton dans les travaux publics

Dans les travaux publics, le béton est indispensable en raison de sa résistance à des sollicitations élevées et de sa longévité face aux agressions environnementales. Il est utilisé pour réaliser des ouvrages d'infrastructures majeurs tels que :

Les ponts, où les progrès technologiques permettent aujourd'hui de construire des portées atteignant plusieurs centaines de mètres, grâce à l'emploi de bétons armés et précontraints adaptés à des sollicitations complexes [23] ;

Les tunnels, où le béton peut être coulé en place ou mis en œuvre sous forme de voussoirs préfabriqués pour assurer la stabilité des galeries [24];

Les barrages, qui requièrent une grande capacité à supporter des charges hydrostatiques importantes et des conditions environnementales difficiles [24];

Les routes, autoroutes et pistes d'aéroport, où sa durabilité et sa capacité à supporter des charges répétées en font un matériau de choix pour des infrastructures de transport à fort trafic [24] .

Au-delà des applications traditionnelles, le béton intervient également dans la construction d'ouvrages spécialisés tels que les ouvrages offshore, les centrales nucléaires et les réseaux

d'assainissement, qui exigent des caractéristiques mécaniques et de durabilité encore plus rigoureuses.

1.10 CONCLUSION PARTIELLE

Ce premier chapitre a porté sur les généralités du béton, en présentant sa définition, ses constituants essentiels, les principes de formulation ainsi que ses propriétés à l'état frais et à l'état durci. Une attention particulière est portée aux additifs, notamment les biocharbons, utilisés comme substituts partiels du ciment afin de réduire l'empreinte carbone du béton. Enfin, Les différentes classifications, les pathologies susceptibles d'affecter le matériau et les domaines d'application du béton, aussi bien dans le bâtiment que dans les travaux publics, ont également été abordés. Ces éléments constituent une base théorique indispensable à la compréhension du comportement du béton et à l'analyse des choix techniques développés dans les chapitres suivants.

Chapitre 2 METHODOLOGIE

2.1 INTRODUCTION

Dans ce chapitre, nous présentons les matériaux utilisés et les essais réalisés en laboratoire pour leur caractérisation, notamment le biocharbon, les granulats, le ciment et l'eau. Nous décrivons ensuite la méthode de formulation des bétons expérimentaux avec substitution partielle du ciment par le biocharbon, ainsi que les essais effectués sur les bétons frais et durcis (étalement, résistance à la compression). Enfin, nous exposons le programme expérimental suivi pour évaluer l'influence du biocharbon sur les performances des bétons.

2.2 NATURE ET ORIGINE DE CONSTITUANTS

Les matériaux utilisés pour la fabrication des bétons expérimentaux proviennent d'origine diverses, chacun jouant un rôle précis dans la formulation. La nature et l'origine du ciment, des granulats, de l'eau de gâchage, ainsi que du biocharbon, ajouté ici comme substitut partiel au ciment dans une démarche à la fois technique et environnementale.

2.2.1 Ciment

Le ciment utilisé est un CEM IV/B 42.5 de type pouzzolanique, produit par Cimerwa (Rwanda), avec une masse volumique de 2,97 g/cm³. [25]

2.2.2 Granulats

Les granulats utilisés dans cette étude sont de deux types : des matériaux concassés et des roulés. Le sable, de fraction 0/4, est roulé et provient de l'île d'Idjwi. Quant aux graviers, de fractions 4/8, 8/15 et 15/25 ils sont issus du concassage de roche volcanique de Goma.

2.2.3 Biocharbon

Le biocharbon utilisé dans cette étude provient de résidus fins issus de la pyrolyse de biomasse, récupérés dans des sacs commerciaux de charbon. Ces résidus ont été soigneusement triés afin d'éliminer les impuretés visibles, puis broyés et tamisés à 0,08 mm (80 µm) afin d'obtenir une poudre homogène et exploitable en substitution partielle du ciment.

2.2.4 Eau de gâchage

L'eau de gâchage utilisée dans cette étude provient d'une source potable, fournie par la REGIDESO et prélevée directement au robinet.

2.3 CARACTERISATION DES CONSTITUANTS

La détermination des caractéristiques du sable et des graviers a été effectuée par des essais, notamment l'analyse granulométrique du sable et des graviers pour étudier la répartition des différentes tailles de particules, l'évaluation du degré de propreté du sable afin de vérifier la présence d'impuretés, ainsi que la mesure des masses volumiques absolue et apparente. Ces tests permettent d'assurer la qualité et la conformité des granulats utilisés dans la composition du béton.

2.3.1 Échantillonnage

Prélever un échantillon d'un matériau consiste à en extraire une fraction destinée aux essais, de manière à ce que cette portion soit représentative de l'ensemble dont elle est issue. Autrement dit, l'échantillon sélectionné doit refléter fidèlement les propriétés de la totalité du matériau, comme s'il en était une réplique à échelle réduite.

L'échantillon de laboratoire correspond à la quantité de matériau nécessaire pour effectuer les essais dans de bonnes conditions. Il est impératif que cette quantité soit au minimum deux fois supérieure à la masse strictement requise pour les tests à réaliser.

Dans cette section, nous décrivons les méthodes d'échantillonnage adoptées, en mettant l'accent sur la technique du quartage, utilisée pour la préparation des échantillons en vue des essais.

2.3.1.1 Techniques d'échantillonnages [24]

Deux étapes essentielles permettent d'obtenir la quantité d'échantillons souhaitée pour les essais en laboratoire.

La première étape consiste à extraire les matériaux directement sur le site, en suivant des lignes verticales. Ces lignes sont privilégiées parce qu'elles traversent les zones où les particules proviennent d'une même masse initiale, avant leur dépôt ou leur stockage. Pour éviter les biais dus aux effets du vent ou de la pluie, les prélèvements ne doivent pas être réalisés en surface, mais à quelques centimètres de profondeur. Sur chaque ligne verticale, on effectue les prélèvements à trois niveaux en haut, au milieu et en bas afin de mieux refléter les variations possibles dans la composition des matériaux.

Une fois les échantillons ramenés au laboratoire, ils sont d'abord regroupés, puis soigneusement mélangés pour en assurer l'homogénéité. Ce mélange est ensuite traité à l'aide d'un séparateur d'échantillons, qui permet d'isoler la quantité exacte requise pour les essais. Si cet équipement n'est pas disponible, on a recours à une méthode plus simple mais tout aussi efficace : le quartage, qui consiste à diviser l'échantillon de façon répétée pour en extraire une portion représentative.

2.3.1.2 Séparation de l'échantillon par quartage

Dans le cadre de l'échantillonnage, le quartage est réalisé de manière manuelle pour obtenir une quantité représentative du matériau à analyser. L'opération débute par un brassage soigneux afin d'homogénéiser le mélange, que l'on étale ensuite sur une surface lisse et propre. À l'aide d'une truelle, ce tas est divisé d'abord en deux moitiés, puis en quatre parts approximativement égales, en traçant deux axes perpendiculaires. Deux parties opposées sont alors prélevées, réunies et à nouveau étalées pour répéter l'opération si la masse reste trop importante par rapport aux besoins de l'essai envisagé [26].

2.3.2 Analyse granulométrique

L'analyse granulométrique, effectuée selon la norme NF EN 933-1 par voie sèche, a pour objectif de déterminer la répartition des particules selon leur taille. L'échantillon, préalablement séché en étuve à $(105 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C})$, est ensuite tamisé à travers une série de tamis normalisés [8]. Dans cette section, nous présentons successivement l'objectif de l'essai, son principe, le mode opératoire, les équipements utilisés ainsi que la méthode d'expression des résultats.

a) But de l'essai

L'Analyse Granulométrique a pour but de déterminer les dimensions des grains, la répartition pondérale des granulats selon les différentes classes des grains par tamisage et d'en déduire le module de finesse.

b) Principe de l'essai

L'essai consiste à trier les différents grains composant l'échantillon à l'aide d'une série de tamis superposés, dont les ouvertures diminuent progressivement du haut vers le bas. Le matériau est déposé sur le tamis supérieur, puis l'ensemble est soumis à des vibrations, permettant ainsi de séparer les grains en fonction de leur taille.

c) Matériels utilisés

Les matériels utilisés pour l'analyse granulométrique sont : Une balance, un tamiseur mécanique, une série de tamis conforme à la norme NF EN 933-2. Les *figures 2-1* illustre l'équipement nécessaire pour cet essai.



Figures 2-1 Matériels analyse granulométrique

d) Mode opératoire

Le mode opératoire pour cet essai est le suivant :

- Monter la colonne de tamis dans l'ordre décroissant des ouvertures de mailles, puis ajouter le couvercle et le fond ;
- Verser le matériau sec dans la colonne de tamis ;
- Agiter mécaniquement la colonne ;
- Retirer les tamis un à un, en commençant par celui ayant la plus grande ouverture, en y adaptant un fond et un couvercle ;
- Déterminer la masse du refus de chaque tamis ;
- Poursuivre l'opération jusqu'à déterminer la masse du refus contenu dans le fond de la colonne de tamis.

e) Expression des résultats

Les différentes masses des refus obtenus pour chaque tamis ont été comparées à la masse totale initiale du matériau, puis converties en pourcentage. Ces valeurs ont ensuite permis de tracer la courbe granulométrique, comportant en ordonnée le pourcentage de refus et en abscisse le diamètre d'ouverture des mailles (D).

✦ Détermination du module de finesse

Le module de finesse d'un granulat correspond au 1/100^e de la somme des refus, exprimés en pourcentage, obtenus sur les différents tamis de la série suivante pour le sable : 0,16 – 0,315 – 0,63 – 1,25 – 2,5 et 5 mm [3]. Il a donc été calculé à l'aide de la formule (2.1).

$$MF = \frac{1}{100} \sum \text{Refus cumulé en \%} \quad (2.1)$$

Avec Mf : le module de finesse du sable.

- Si $2,2 < Mf < 2,8$: bon sable à béton ;
- Si $Mf < 2,2$: le sable a une majorité d'éléments fins et très fins ;
- Si $Mf > 2,8$: le sable manque de fines et le béton y perd en ouvrabilité.

2.3.3 Degré de propreté sable

Le degré de propreté du sable est évalué par l'essai d'équivalent de sable, réalisé conformément à la norme NF P 18-598. Dans cette section, nous présentons successivement l'objectif de l'essai, son principe, le mode opératoire, les matériels utilisés ainsi que la méthode d'expression des résultats [7].

a) But de l'essai

L'essai de l'équivalent sable vise à vérifier le degré de propreté des sables entrant dans la composition des bétons.

b) Principe de l'essai

L'essai consiste à introduire un échantillon de sable et une petite quantité de solution flocculant dans une éprouvette graduée, puis à agiter de manière à détacher les pellicules argileuses présentes sur les particules de sable de l'échantillon. L'équivalent de sable est ensuite calculé à l'aide de la formule (2.2).

$$ES = \frac{H_1}{H_2} \times 100(\%) \quad (2.2)$$

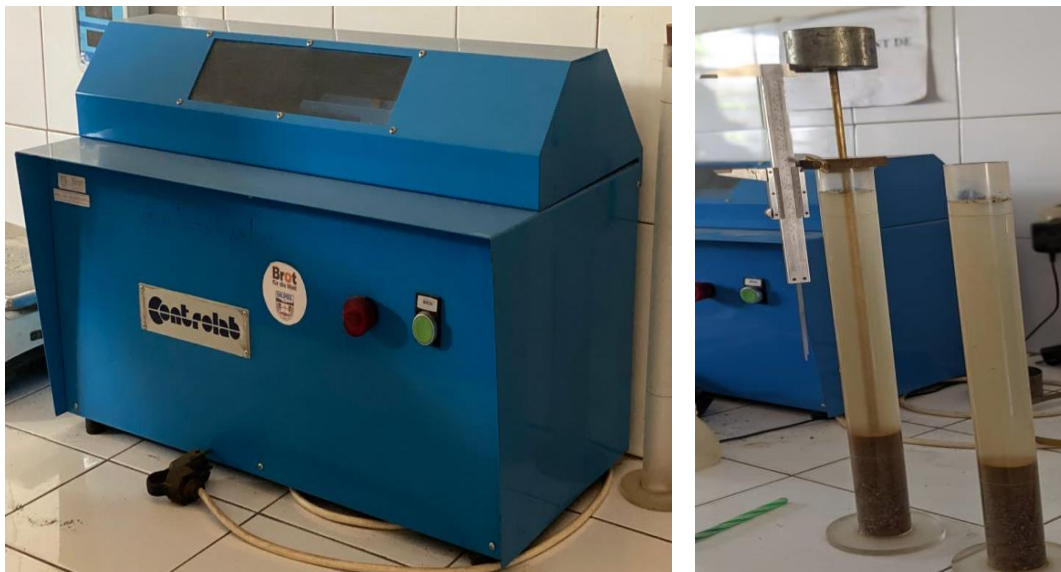
Où :

- H_1 est la hauteur du dépôt de sable visible en (cm).

- H_2 est la hauteur totale y compris le floculat (fines en suspension) en (cm).
- ES est l'équivalent de sable

c) Matériels utilisés

Selon la norme NF P 18-598, le matériel nécessaire à cet essai comprend des éprouvettes en plexiglas, chacune munie de deux traits repères et d'un bouchon, un entonnoir pour l'introduction du sable, une bonbonne de 5 litres avec bouchon et siphon, un tube laveur métallique plongeant, un agitateur électrique, une règle métallique pour mesurer les hauteurs de sable et de floculat, ainsi qu'un piston taré équipé d'une masse coulissante de 1 kg pour la prise de mesures. Les *figures 2-1* ci-après présentent les matériels utilisés pour le degré de propreté .



Figures 2-2 Matériels d'équivalent de sable

d) Mode opératoire

Le mode opératoire comprend les étapes suivantes :

- Préparer l'échantillon ;

- Régler l'appareil ;
- Remplir les éprouvettes avec la solution lavante jusqu'au premier trait repère ;
- Ajouter la quantité de sable nécessaire pour l'essai ;
- Éliminer les bulles d'air, puis laisser reposer pendant 10 minutes ;
- Boucher les éprouvettes et les agiter avec un mouvement horizontal rectiligne sinusoïdal de 20 cm d'amplitude (90 allers-retours en 30 secondes) ;
- Laver et compléter le remplissage des éprouvettes à l'aide du tube laveur jusqu'au dernier trait repère ;
- Laisser reposer pendant 20 minutes ;
- Abaisser lentement le piston taré et le poser délicatement sur le sable ;
- Mesurer les hauteurs h_1 et h_2 , qui correspondent respectivement à la hauteur du sable propre et à la hauteur du sable propre plus le floculat.

e) Expression des résultats

Les résultats sont exprimés sous forme de pourcentages suivant la formule (2.2) et interprétés suivant le *Tableau 2-1* ci-après.

Tableau 2-1 Expressions quantitatives des degrés de propreté des sables [7]

ES a vue	ES au piston	Conclusions
ES<65%	ES<60%	Sable argileux, risque de retrait ou gonflement. Sable à rejeter pour un béton de qualité
65%≤ES≤75%	65%≤ES≤75%	Sable légèrement argileux, de propreté admissible pour le béton qualité courante quand le retrait n'a pas de conséquences notables sur la qualité du béton
ES>85%	ES>80%	Argileuses risque d'entraîner un défaut de plasticité du béton qu'il faudra compenser par une augmentation du dosage en eau

2.3.4 Masse volumique absolue

La masse volumique absolue d'un granulat est la masse par unité de volume de celui-ci. Elle a été déterminée selon les normes NF P 18-554 pour les graviers et NF P 18-555 pour les sables. La méthode qui a été utilisée est celle de l'éprouvette graduée. Dans cette section, nous présentons tour à tour le principe de l'essai, le mode opératoire ainsi que l'expression des résultats.

a) Principe de l'essai

L'essai a consisté à remplir un récipient vide de volume (V) avec le matériau sec non tassé, puis à le peser afin de calculer la masse volumique à l'aide de la formule (2.4):

$$\rho_{\text{abs}} = \frac{M}{V_0 - V_1} \quad (2.4)$$

Où :

ρ_{abs} : masse volumique absolue (g/cm³)

M : la masse sèche du matériau en (g) ;

V₀: volumes départ ;

V₁ : volume après incorporations M

b) Matériels utilisés

L'éprouvette utilisée est graduée, ce qui permettra de lire avec précision les volumes. Cette lecture est essentielle pour calculer la densité réelle de particules solides en excluant les pores et les vides internes et constitue une donnée fondamentale pour la formulation du béton. La figure ci-après présente le matériel utilisé pour la réalisation de cet essai.



Figure 2-3 Eprouvette graduée pour la masse volumique absolue.

c) Mode opératoire

La détermination de la masse volumique apparente d'un granulat a pour mode opératoire :

- Sécher l'échantillon de granulats à l'étuve jusqu'à masse constante ;
- Peser l'échantillon sec et relever sa masse (M) ;
- Verser un volume connu d'eau dans l'éprouvette graduée et noter le volume initial (V_1) ;
- Introduire l'échantillon sec dans l'éprouvette ;
- Éliminer les bulles d'air par agitation douce ;
- Relever le volume final (V_2) ;
- Calculer le volume réel des granulats : $V = V_2 - V_1$.

2.3.5 Masse volumique apparente

La masse volumique apparente c'est la masse d'un corps par unité de volume total y compris les vides entre les grains le constituant. L'essai de la masse volumique apparente s'est effectué selon les normes NF P 18-544 pour les graviers et NF P 18-555 pour les sables. Il consiste au

remplissage d'un récipient vide de volume (V) du matériau sec non tassé qui a été pesé pour en déduire la masse volumique selon la formule (2-5).

$$\rho_{app} = \frac{M}{V} (\text{g}/\text{cm}^3) \quad (2-5)$$

Avec ρ_{app} la masse volumique apparente, V le volume du récipient et M la masse sèche du matériau.

- **Matériels utilisés**

La figure ci-dessous permet de visualisés le matériel utilisé pour cet essai.



Figure 2-4 Moule CBR

2.3.6 Essai Los Angeles

Cet essai a pour objectif d'évaluer la résistance d'un matériau aux chocs et à la fragmentation, en déterminant le coefficient de Los Angeles [27] . La présentation qui suit expose le principe, le mode opératoire ainsi que la méthode de calcul des résultats.

a) Principe de l'essai

Le principe repose sur la mesure de la proportion de particules inférieures à 1,6 mm, générées après avoir soumis l'échantillon à des chocs répétés des boulets normalisés et aux frottements réciproques à l'intérieur de la machine Los Angeles.

La granularité du matériau testé est choisie parmi six classes granulaires normalisées : (4/6,3), (6,3/10), (10/14), (10/25), (16/31,5) ou (25/50).

b) Matériels utilisés

Cette section présente le matériel utilisé pour l'essai de Los Angeles, destiné à évaluer la résistance des granulats à la fragmentation et à l'usure sous l'effet des chocs. L'équipement nécessaire à cette expérience est illustré dans les *figures 2-5* suivante.



Figures 2-5 Machine de Los Angeles

c) Mode opératoire

Le Mode opératoire :

- Introduire soigneusement l'échantillon et les boulets d'acier dans le tambour, puis mettre en marche la machine de Los Angeles ;
- Effectuer 500 rotations à une vitesse régulière comprise entre 30 et 33 tours par minute;
- À la fin de l'essai, recueillir les granulats dans un bac placé sous l'appareil, en positionnant l'ouverture du tambour juste au-dessus du bac afin d'éviter toute perte de matériau ;

- Tamiser le contenu du bac sur un tamis de 1,6 mm ;
- Peser le refus sec, la valeur obtenue correspondant au refus ;

Pour qu'on puisse trouver la valeur de P et de CLA nous allons passer par ces formules (2.5) ;(2.6).

- P est obtenus par :

$$P = 5000 - Refus \quad (2.5)$$

- Le coefficient de Los Angeles est donné par :

$$CLA = \frac{P}{5000} \times 100 \quad (2.6)$$

Où

- Cla : le coefficient de Los Angeles ;
- P : est le passant à 1,6mm.

d) Expression des résultats

Moins le coefficient Los Angeles est élevé, meilleure est la résistance du granulat à la fragmentation par chocs. Les valeurs de ce coefficient caractérisent la nature du gravier et permettent d'évaluer sa qualité pour la fabrication du béton, comme le montre le *tableau 2-2* qui va suivre.

Tableau 2-2 Types de graviers selon le coefficient LA [7]

Valeurs du coefficient Los Angeles	Appréciation
$LA \leq 15$	Très bon à bon
$15 \leq LA \leq 25$	Bon à moyen
$25 \leq LA \leq 40$	Moyen à faible
$LA > 40$	Médiocre, mauvaise qualité

Le coefficient LA ne doit pas excéder 45 pour les granulats du béton

2.3.7 Absorption d'eau

L'absorption d'eau des granulats correspond au rapport entre la masse d'un échantillon plongé dans l'eau pendant 24 heures à 20 °C, sous pression atmosphérique, et sa masse à l'état sec. Pour cet essai, nous détaillons la procédure ainsi que le mode de calcul des résultats.

a) Mode opératoire

Le taux d'absorption des graviers a été évalué selon la norme NF P 18-555, en procédant comme suit :

- L'échantillon est immergé dans l'eau pendant 24 heures à 20 °C, sous pression atmosphérique ;
- Il est ensuite étalé sur une surface plane et non absorbante ;
- L'eau de surface est éliminée à l'aide d'un chiffon ;
- La masse, notée M_a , est mesurée ;
- Enfin, l'échantillon est séché pendant 24 heures à $105 \text{ °C} \pm 5$, pour obtenir la masse M_s .

b) Expression des résultats

Le résultat de l'essai d'absorption d'eau des graviers est exprimé en pourcentage et calculé à partir de la formule (2.7) :

$$Ab = \frac{Ma - Ms}{Ms} \times 100(\%) \quad (2.7)$$

Avec :

- Ab en (%) : l'absorption d'eau ;
- Ma en (g) : la masse humide ;
- Ms en (g) : la masse sèche.

2.3.8 Masse volumique absolue du ciment et du biocharbon

La masse volumique absolue du biocharbon correspond à la masse par unité de volume de la matière solide. Elle est caractérisée par des valeurs faibles en raison de sa structure carbonée

poreuse issue de la pyrolyse des biomasses et constitue un paramètre important dans la formulation des bétons à faible empreinte carbone [20].

a) Principe de l'essai

La masse volumique absolue, ou densité réelle, correspond au rapport entre la masse de la matière sèche et le volume réel occupé par les particules solides, en excluant les vides intergranulaires. Elle est déterminée à l'aide d'un pycnomètre en mesurant le volume d'eau déplacé par une masse connue de biocharbon sec.

b) Matériels utilisés

La *figure 2-6* illustre les matériels utilisés pour la réalisation de cet essai.



Figure 2-6 Matériels nécessaire pour la masse volumique du ciment et du biocharbon

c) Mode opératoire

- ✓ Prélever un échantillon représentatif de biocharbon.
- ✓ Peser une masse connue M de l'échantillon sec.
- ✓ Remplir un pycnomètre avec de l'eau distillée jusqu'à un volume de référence V_0 .

- ✓ Introduire l'échantillon dans le pycnomètre, compléter avec de l'eau distillée et éliminer les bulles d'air.
- ✓ Noter le nouveau volume V_1 .
- ✓ Calculer le volume solide : $V_s = V_0 - V_1$.

d) Expression des résultats

La masse volumique absolue est donnée par la formule (2.8) :

$$\rho_{abs} = \frac{M}{V_0 - V_1} \quad (2.8)$$

Avec :

- ρ_{abs} : masse volumique absolue
- M : l'échantillon sec
- V_0 : volumes départ ;
- V_1 : volume après incorporations

2.3.9 Essai de consistance [28]

La consistance normale du ciment est déterminée par l'essai normalisé [29].

a) But de l'essai

Cet essai a pour but de repérer la consistance d'une pâte de liant Hydraulique à l'aide de l'appareil de Vicat muni d'une sonde de consistance.

b) Principe de l'essai

Cet essai est réalisé à l'aide de l'appareil de Vicat équipé d'une sonde de diamètre de 10 mm, selon la norme (NF EN 196-3, Août 1995). La pâte est composée de ciment et d'eau. On définit le rapport E/C ou C/E qui permet de définir une pâte de consistance normale, c'est-à-dire ni trop, ni trop peu d'eau. On mesure l'enfoncement d'une sonde amovible de diamètre 10 mm, fixée à la partie mobile de l'appareil de Vicat dont la masse totale est de 300 g, dans une pâte de ciment maintenue dans un moule tronconique. L'enfoncement est fonction de la consistance

de la pâte, on parle de consistance normale lorsque la sonde s'immobilise au plus tard 30 secondes après l'avoir lâchée à une distance de 6 ± 1 mm du fond du moule. Si cette distance n'est pas atteinte, il convient de modifier le rapport E/C ou C/E afin d'obtenir la consistance normale. [28]

c) Mode opératoire

Le mode opératoire est conforme au processus suivant :

- Préparer la pâte en commençant avec 500g de ciment à tester ; 135g d'eau dans un premier temps ;
- Remplir immédiatement le moule tronconique, araser la surface ;
- Abaisser la sonde jusqu'à ce qu'elle arrive au contact de la pâte ;
- Libérer les parties mobiles ;

La lecture de la valeur « d » indiquée par l'index :

Si $d < 5$ mm, recommencer avec 1 % d'eau en moins

Si $d > 7$ mm, recommencer avec 1 % d'eau en plus

Répéter l'essai avec des pâtes de teneurs en eau différentes jusqu'à ce qu'on trouve une donnant une distance de $6 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$ [28].

d) Matériels utilisés

Cet essai est réalisé à l'aide d'un appareil qu'on appelle VICAT, qui est illustré dans la figure suivante ;



Figure 2-7 Appareil de Vicat

2.4 FORMULATION DU BÉTON

La formulation d'un béton consiste à déterminer, avec précision, les quantités et les caractéristiques de chacun de ses constituants, de manière à satisfaire les exigences fixées, tant à l'état frais qu'à l'état durci.

Dans le cadre de ce travail, nous avons retenu la méthode de **Dreux-Gorisse**, reconnue pour sa simplicité d'application et pour la proportion relativement importante de graviers qu'elle intègre dans ses formulations.

2.4.1 Choix et justification de la méthode

Le choix de l'utilisation de la méthode de Dreux Gorisse dans notre travail a été guidé non seulement par sa facilité de mise en application mais aussi par la grande proportion de graviers qui entre dans sa formulation. Elle repose sur quelques hypothèses facilitant la démarche, et ne requiert, comme données préalables, que la connaissance des courbes granulométriques des granulats employés. Elle permet ainsi de déterminer, de manière optimale, les quantités d'eau, de ciment et de granulats nécessaires à la confection d'un mètre cube de béton conforme aux exigences du cahier des charges [7].

2.4.2 Méthode de DREUX GORISSE

La méthode dite de Dreux-Gorisse vise à fournir rapidement une formule de composition initiale, suffisamment proche de la réalité du béton recherché. Toutefois, cette formule doit être ajustée à l'aide de quelques gâchées d'essai et d'éprouvettes, afin de l'adapter aux matériaux effectivement disponibles et aux performances visées [8].

2.4.2.1 Données de base

La dimension maximale des granulats, la résistance souhaitée et la consistance désirée sont les données de base dans la formulation du béton par la méthode de Dreux Gorisse.

a. La dimension maximale des granulats

La dimension maximale D joue un rôle déterminant dans la résistance du béton, principalement grâce à l'apport du gros granulat. Plus les grains sont gros, plus le dosage en ciment peut être réduit, à condition que leur qualité et leur dimension restent compatibles avec une bonne facilité de mise en œuvre.

b. La résistance souhaitée

La résistance cible est généralement définie par la résistance en compression mesurée sur éprouvettes cylindriques à 28 jours. Afin de tenir compte des dispersions et de l'écart quadratique, la résistance nominale à 28 jours est majorée de 15 %. Dans notre étude, la résistance en compression a été calculée à l'aide de la formule (2.10).

$$f_c = f_{c28} + 15\% \quad (2.10)$$

Avec :

- f_c : Résistance en compression désirée à 28 jours
- f_{c28} : Résistance visée en compression à 28 jours

c. La consistance désirée

Elle est liée à la plasticité du béton, dépend de la nature de l'élément à réaliser (plus ou moins massif ou plus ou moins ferrillé), de la difficulté de bétonnage et des moyens de serrage. Elle est généralement mesurée par l'affaissement au cône d'Abrams, illustré dans la figure suivante ;



Figure 2-8 Cône d'Abrams

2.4.2.2 Détermination du dosage en eau et en ciment

Le dosage en ciment dépend à la fois du rapport C/E (ciment/eau) et de la quantité d'eau nécessaire pour atteindre l'ouvrabilité recherchée. Ce rapport est déterminé grâce à la formule (2.11).

$$f_c = G \times FCE \times \left(\frac{C}{E} - 0,5 \right) \quad (2.11)$$

Avec :

- f_c : La résistance moyenne en compression désirée à 28 jours en MPa

- F_{CE} : la classe vraie du ciment à 28 jours en MPa
- C : Le dosage en ciment en kg/m^3 :
- E : Le dosage en eau en l/m^3 ;
- G : Le coefficient granulaire (compris entre 0,35 et 0,65).

Le coefficient granulaire « G » est fonction de la qualité et de la taille maximale des granulats. Le *Tableau 2-3* reprend les coefficients granulaires G en fonction de la qualité et de la taille des granulats.

Tableau 2-3 Les valeurs approximatives du coefficient granulaire G [8]

Qualité des granulats	Dimension D_{max} des granulats		
	Fins $D_{max} < 16 \text{ mm}$	$20 < D_{max} < 31,5$	Gros $D_{max} > 50 \text{ mm}$
Excellente	0,55	0,6	0,65
Bonne, courante	0,45	0,5	0,55
Passable	0,35	0,4	0,45

Le dosage en ciment est ainsi dépendant du rapport C/E mais aussi du dosage en eau E nécessaire pour une ouvrabilité satisfaisante. L'abaque de la *Figure 2-9* Abaque permettant d'évaluer approximativement le dosage en ciment à prévoir en fonction du rapport C/E et de l'ouvrabilité désirée *Figure 2-9* permet d'évaluer approximativement C en fonction de C/E et de l'ouvrabilité désirée qui doit être considérée comme une donnée du problème.

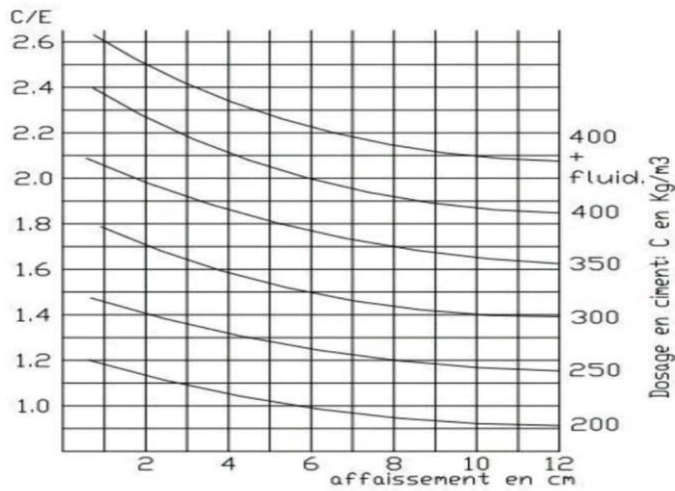


Figure 2-9 Abaque permettant d'évaluer approximativement le dosage en ciment à prévoir en fonction du rapport C/E et de l'ouvrabilité désirée [8]

2.4.2.3 Détermination du dosage en eau

Une fois choisi le dosage de ciment C, on déduit alors le dosage approximatif en eau totale à prévoir (provisoirement), susceptible d'être ajusté après essais pratiques de plasticité et d'ouvrabilité. L'abaque de la Figure 2-10 illustre la variation approximative de l'eau en fonction de l'affaissement et du test d'ouvrabilité C.E.S.

Il ne s'agit bien entendu que d'ordre de grandeur pour des bétons courants et permettant de dégrossir rapidement une formule de composition mais comme pour tous les facteurs de cette

composition, c'est par des essais sur éprouvettes que les divers éléments constitutifs et l'eau tout particulièrement, peuvent être définitivement dosés.

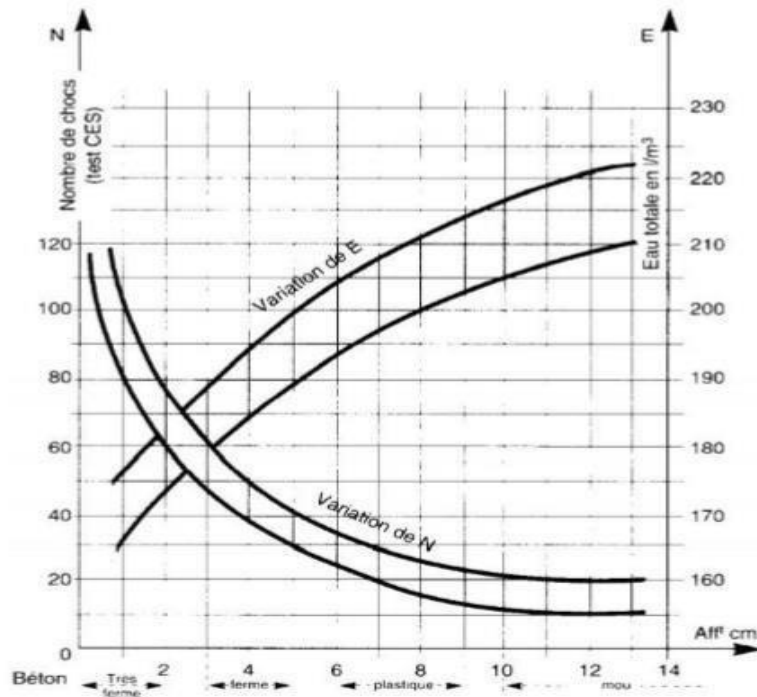


Figure 2-10 Variation relatives moyennes du dosage en eau E et du nombre de chocs du test d'ouvrabilité C.E.S en fonction de l'affaissement [8].

Les données précédentes sont spécifiquement applicables aux bétons pour lesquels la dimension maximale des granulats est d'environ $D = 20$ mm (dimension la plus courante). Si l'on a un $D < 20$ mm, la surface spécifique des granulats augmente et, à plasticité équivalente, il faudra légèrement majorer le dosage en eau, et vice versa. La correction sur le dosage en eau correspondant à $D \neq 20$ mm peut être approximativement évaluée d'après les valeurs du *Tableau 2-5* en fonction de D [8].

Tableau 2-4 Correction sur le dosage en eau en fonction de Dmax [8]

Dmax des granulats (en mm)	5	8 à 10	12,5 à 16	20 à 25	30 à 40	50 à 63	80 à 100
Correction sur le dosage de pâte (en %)	15	9	4	0	-4	-8	-12

a. Dosage réel en eau

La quantité totale d'eau (sur matériaux supposés secs) étant estimée, il convient de soustraire l'eau d'apport contenue dans les granulats humides, afin de déterminer la quantité d'eau à ajouter lors du malaxage. À défaut de mesures précises de l'humidité, le *Tableau 2-6* donne des valeurs approximatives [8].

Tableau 2-5 Teneur en eau approximative des granulats courants en litres pour un metre cube de materiau (en volume apparent) [8]

Degré apparent d'humidité	Eau d'apport en l/m ³			
	Sable 0/5	Gravillon 5/12,5	Gravier 5/20	Gravier 20/40
Apparence :				
Sèche	0 à 20	Négligeable	Négligeable	Négligeable
Humide	40 à 60	20 à 40	10 à 30	10 à 20
Très humide	80 à 100	40 à 60	30 à 50	20 à 40
Saturée, égouttée	120 à 140	60 à 80	50 à 70	40 à 60

Il convient de souligner que l'apport en eau des granulats peut être considérable. Par exemple, des granulats récemment lavés ou saturés par de fortes pluies peuvent contenir jusqu'à 50 litres d'eau pour 400 litres de sable, et presque autant pour 800 litres de gravier soit près de la moitié de l'eau totale nécessaire. À l'inverse, des granulats secs, exposés longtemps au soleil en saison sèche, peuvent avoir une teneur en eau négligeable [8].

2.4.2.4 Qualité des granulats

Les graviers utilisés pour la confection du béton doivent présenter une bonne qualité minéralogique, être suffisamment résistants et exempts d'impuretés. Leur distribution granulométrique, bien qu'ayant une influence certaine, reste moins déterminante que celle du sable. Ce dernier joue en effet un rôle majeur dans le comportement du béton : sa propreté, son module de finesse ainsi que sa courbe granulométrique doivent être rigoureusement contrôlés conformément aux normes en vigueur.

a. Tracé de la courbe granulaire de référence

La courbe de référence est tracée sur un graphique de type AFNOR, à coordonnées semi-logarithmiques (abscisse logarithmique pour les dimensions, ordonnée linéaire pour les pourcentages cumulés). La construction de cette courbe consiste à définir la ligne OAB où le point O correspond à l'origine, le point B (placé à 100 % sur l'axe des ordonnées) correspond au diamètre maximal D du granulat et le point de rupture A est défini par ses coordonnées définies en abscisse (X_A) à partir de la dimension D, et en ordonnée par Y_A (en %).

Lorsque $D \leq 20$ mm, X_A est égal à $D/2$. Pour $D > 20$ mm, X_A se situe au milieu de la plage de graviers comprise entre 5 mm (module 38) et le diamètre maximal D. La valeur de Y_A est calculée selon la relation suivante (2.12) [8]:

$$Y_A = 50 - \sqrt{1,25D} + K + K_s \quad (2.12)$$

Avec

- D : la dimension du plus gros granulat ;
- K : coefficient correcteur qui dépend du dosage en ciment, de la puissance de la vibration, de la forme des granulats roulés ou concassés (c'est surtout le sable dont l'influence est ici prépondérante) ;
- K_s : correction supplémentaire dépendant du module de finesse du sable obtenu par la relation (2.13) :

$$K_s = 6Mf - 15 \quad (2.13)$$

Le *Tableau 2-7* reprend les différentes valeurs de K en fonction du dosage en ciment, de la puissance de vibration et de la forme des granulats (roulés ou concassé).

Tableau 2-6 Valeur du terme correcteur K [8]

Vibration		Faible		Normale		Puissante	
Forme des granulats (du sable en particulier)		Roulé	Concassé	Roulé	Concassé	Roulé	Concassé
Dosage en ciment (Kg/m ³)	400+fluidifiants	-2	0	-4	-2	-6	-4
	400	0	+2	-2	0	-4	-2
	350	+2	+4	0	+2	-2	0
	300	+4	+6	+2	+4	0	+2
	250	+6	+8	+4	+6	+2	+4
	200	+8	+10	+6	+8	+4	+6

b. Coefficient de compacité

Le coefficient de compacité γ exprime le rapport entre le volume absolu des constituants solides (ciment + granulats) et le volume total d'un mètre cube de béton frais. Il traduit donc l'efficacité du squelette granulaire et dépend à la fois de la plasticité du béton, du diamètre maximal des granulats et du mode de vibration employé. Les valeurs usuelles de ce coefficient sont récapitulées dans le tableau de référence *Tableau 2-8* :

Tableau 2-7 Valeurs du coefficient de compacité [7]

Consistance	Serrage	Coefficient de compacité γ						
		D=5	D=10	D=12,5	D=20	D=31,5	D=50	D=80
Molle	Piquage	0,75	0,78	0,795	0,805	0,81	0,815	0,82
	Vibration faible	0,755	0,785	0,8	0,81	0,815	0,82	0,825
	Vibration normale	0,76	0,79	0,805	0,815	0,82	0,825	0,83
Plastique	Piquage	0,76	0,79	0,805	0,815	0,82	0,825	0,83
	Vibration faible	0,765	0,795	0,81	0,82	0,825	0,83	0,835
	Vibration normale	0,77	0,8	0,815	0,825	0,83	0,835	0,84
	Vibration puissante	0,775	0,805	0,82	0,83	0,835	0,84	0,845
Ferme	Vibration faible	0,775	0,805	0,82	0,83	0,835	0,845	0,845
	Vibration normale	0,78	0,81	0,825	0,835	0,84	0,85	0,85
	Vibration puissante	0,785	0,815	0,83	0,84	0,845	0,855	0,855

NOTA : Ces valeurs sont convenables pour des granulats roulés, sinon il conviendra d'apporter les corrections suivantes :

- Sable roulé et gravier concassé : $\gamma-0,01$
- Sable et gravier concassés : $\gamma-0,03$
- Granulats légers : $\gamma-0,03$
- En fonction du dosage en ciment : $\gamma + \frac{C-350}{5000}$

2.4.2.5 Dosages de granulats

La courbe granulaire de référence OAB est tracée en superposition des courbes granulométriques réelles des granulats disponibles. Des droites de partage sont tracées : elles relient le point à 95 % de la courbe d'un granulat au point à 5 % de la courbe du granulat suivant. L'intersection de ces droites avec la courbe de référence permet de déterminer le pourcentage en volume absolu de chaque fraction granulaire nécessaire pour obtenir un squelette bien équilibré.

a. Dosage volumique

Si C est le dosage en ciment et ρ_c la masse spécifique du ciment, le volume absolu des grains de ciment est obtenu par la formule (2.14).

$$V_c = \frac{C}{\rho_c} \quad (2.14)$$

Si γ est le coefficient de compacité choisit dans le Tableau 2.8 en fonction de D , de la consistance et de l'efficacité du serrage ; le volume absolu de l'ensemble des granulats est déterminé par la formule (2.15).

$$V = \gamma - V_c \quad (2.15)$$

Les volumes absolus de chacun des granulats sont par la suite obtenus par la formule (2.16).

$$\begin{cases} V_s = \%S \times V \\ V_G = \%G \times V \end{cases} \quad (2.16)$$

Avec :

- V_s et V_G , respectivement les volumes absolus du sable et des gravillons ;
- $\%S$ et $\%G$, les pourcentages du sable et des gravillons obtenus sur les compositions optimales des bétons ;
- V le volume absolu des granulats.

b. Dosage massique

Connaissant les masses spécifiques ρ_s et ρ_G , respectivement masse spécifique du sable et du gravier, on déduit les masses m_s et m_G , respectivement masse du sable et du gravier, de la formule (2.17).

$$\begin{cases} m_s = V_s \times \rho_s \\ m_G = V_G \times \rho_G \end{cases} \quad (2.17)$$

2.5 CARACTÉRISATION DES BÉTONS

Pour mieux comprendre le comportement du béton, des essais ont été réalisés tant à l'état frais qu'à l'état durci. Cette caractérisation s'est faite par différents essais normalisés sur les bétons d'étude, d'abord l'essai d'étalement au cône d'Abrams ensuite les essais sur le béton durci.

2.5.1 Essai sur le béton frais

Le principal essai du béton frais est la maniabilité ou l'ouvrabilité. C'est l'indice qui indique l'aptitude à la mise en place du béton dans un moule.

2.5.1.1 Affaissement au cône d'Abrams [8]

Le slump test est l'essai le plus répandu pour juger de la consistance du béton. Simple et économique, il ne requiert qu'un matériel de base et peut être réalisé par un personnel peu expérimenté, après une brève formation pratique.

Selon la norme NF P 10-451, l'essai s'effectue à l'aide d'un moule tronconique ($h = 30$ cm, $D = 20$ cm en base, $d = 10$ cm au sommet). Le moule est rempli en trois couches successives, chacune étant compactée par 25 coups de tige métallique ($\varnothing = 16$ mm, extrémité arrondie). on soulève ensuite le moule avec précaution et on mesure l'affaissement.

Il s'agit ici de constater l'affaissement d'un cône de béton sous l'effet de son propre poids. Plus cet affaissement sera grand est plus le béton sera réputé fluide.

Les mesures sont évidemment quelque peu dispersées et il ne faut pas accorder à cet essai un caractère trop rigoureux, mais on peut admettre qu'il caractérise bien la consistance d'un béton et permet le classement approximatif indiqué au *Tableau 2-9*.

Tableau 2-8 Appréciation de la consistance du béton en fonction de l'affaissement au cône [8]

Classe de consistance	Affaissement (cm)	Tolérance (cm)
Ferme	0 à 4	± 1 cm
Plastique	5 à 9	± 2 cm
Très plastique	10 à 15	± 3 cm
Fluide Fl	≥16	± 3 cm

Cet essai ne se prête pas à l'évaluation des bétons particulièrement fermes ou secs, dont l'affaissement est presque nul. Dans ce cas, aucune valeur négative n'existe pour traduire le résultat, et l'on peut même observer l'écrasement du cône, phénomène qui ne doit pas être confondu avec un affaissement classique. De la même manière, il n'est pas adapté aux bétons trop plastiques, pour lesquels un affaissement supérieur à une quinzaine de centimètres perd de sa signification. Malgré ces limites, ce test demeure pertinent et suffisamment sensible pour apprécier la consistance de la majorité des bétons utilisés en pratique courante.

a. Équipements nécessaires

La norme NF P 18-541 décrit précisément le matériel requis pour l'essai d'affaissement. Celui-ci est constitué de quatre éléments principaux :

- Un moule tronconique ouvert aux deux extrémités, haut de 30 cm, avec une base de 20 cm de diamètre et un sommet réduit à 10 cm,
- Une plaque plane servant de support,
- Une tige métallique de compactage,
- Un portique ou dispositif de mesure destiné à relever l'affaissement

2.5.2 Essais sur le béton durci

Dans le cas du béton ayant atteint son état durci, deux types d'essais sont généralement effectués afin de caractériser ses performances mécaniques : la mesure de la densité et la détermination de la résistance à la compression.

2.5.2.1 Densité du béton durci

La densité d'un béton durci est définie comme le rapport entre sa masse volumique et celle de l'eau. Cet essai a pour objectif de déterminer la masse volumique effective d'un échantillon de béton et revêt une grande importance, car il permet d'évaluer certaines de ses propriétés physiques et mécaniques essentielles. [30]

a. Mode opératoire et expression de résultats

Le principe de cet essai consiste à mesurer la masse et le volume d'un échantillon de béton durci, afin d'en déduire directement sa densité.

L'échantillon utilisé doit avoir terminé sa phase de durcissement, ce qui correspond généralement à une période de 28 jours après le coulage. Une fois préparé, il est simplement pesé afin d'obtenir sa masse m , puis son volume est évalué. La densité est ensuite calculée à l'aide de la relation suivante (2.18) :

$$d = \frac{m}{\rho_w \times V} \quad (2.18)$$

Avec :

- d : la densité du béton durci ;
- M : la masse de l'échantillon de béton durci en (kg) ;
- V : le volume en (m^3) ;
- ρ_w : la masse volumique de l'eau (environ $1000\text{kg}/m^3$).

2.5.2.2 Résistance à la compression

L'évaluation de la résistance à la compression est réalisée sur des éprouvettes cylindriques, conformément aux prescriptions de la norme NF EN 12390-3. L'essai est effectué à l'aide d'une presse hydraulique équipée de doubles manomètres et de plateaux adaptés, capable de supporter des charges allant jusqu'à 5000 kgf.

La résistance est déterminée en divisant la charge de rupture appliquée par la surface sollicitée, selon la formule normalisée correspondante (2.19). Cet essai permet de quantifier la capacité portante du béton et reste un indicateur essentiel de ses performances mécaniques.

$$R_{cj} = \frac{F}{A} \quad (MPa) \quad (2.19)$$

Où :

- R_{cj} la résistance à la compression à j jours en MPa ou en N /mm²,
- F est la force qui agit sur l'éprouvette en (N)
- A est la section de l'éprouvette (mm²)

2.6 DETERMINATION DE LA REDUCTION DE CARBONE APRES SUBSTITUTION

La présente section expose la méthodologie retenue pour quantifier la réduction des émissions de dioxyde de carbone (CO₂) induite par cette substitution. Elle précise l'objectif de l'évaluation, le principe général de calcul, le mode opératoire, les données exploitées ainsi que la méthode de présentation des résultats, en conformité avec les recommandations de l'Agence internationale de l'énergie (IEA) relatives aux émissions du secteur cimentier [31].

2.6.1 But de la méthode

Cette méthode vise à quantifier la réduction des émissions de dioxyde de carbone (CO₂) obtenue par la substitution partielle du ciment par le biocharbon dans le béton, afin d'évaluer l'impact de cette substitution sur l'empreinte carbone du matériau.

2.6.2 Principe de la méthode

Le principe repose sur la comparaison des émissions de CO₂ associées à un béton de référence (BC), formulé sans biocharbon, et celles des bétons substitués (BD), dans lesquels une fraction du ciment est remplacée par du biocharbon. La quantité de CO₂ évitée est estimée à partir de la masse de ciment substituée et d'un facteur d'émission moyen du ciment, exprimant la quantité de CO₂ émise lors de la production d'un kilogramme de ciment. Selon les rapports de l'IEA, les émissions spécifiques du ciment Portland se situent généralement dans une fourchette comprise entre 0,65 et 0,95 kg CO₂ par kg de ciment, en fonction des procédés et des sources d'énergie, ce qui permet l'utilisation d'une valeur moyenne représentative pour les évaluations comparatives [31].

2.6.3 Mode opératoire

Le mode opératoire comprend les étapes suivantes :

- ✓ Détermination de la masse de ciment utilisée dans 1 m³ de béton de référence (BC).
- ✓ Application des taux de substitution du ciment par le biocharbon (1 %, 3 %, 5 %, 7 % et 9 %).
- ✓ Calcul de la masse de ciment substituée pour chaque formulation de béton BD.
- ✓ Estimation de la quantité de CO₂ évitée

Les émissions liées à la production du biocharbon ne sont pas prises en compte dans cette approche, l'objectif étant d'évaluer l'effet direct de la réduction de la quantité de ciment, conformément à une analyse comparative simplifiée recommandée dans les études sectorielles [31].

2.6.4 Expressions de résultats

Les résultats sont calculés à partir des formules :(2.20) ;(2.21) ;(2.22) ;(2.23)

$$M_s = T_s \times M_c \quad (2.20)$$

Où : T_s est le taux de substitution du ciment par le biocharbon (%) ; M_c est la masse de ciment dans le béton de référence (kg/m³) ; M_s est la masse du ciment substituée. Cette formule est basée sur le principe de substitution proportionnelle du ciment, tel que présenté dans les stratégies de décarbonations du secteur cimentier [32].

$$CO_{2reduit} = M_s \times FE_c \quad (2.21)$$

Où : FE_c est le facteur d'émission du ciment (kg CO₂/kg ciment), qui sera la valeur moyenne recommandée par l'IEA pour le ciment portland [31]. Cette formule permet de quantifier la réduction directe des émissions de CO₂ liée à la diminution de la quantité de ciment.

$$CO_{2,BD} = (M_c \times FE_c) - CO_{2reduit} \quad (2.22)$$

Où : $CO_{2,BD}$ est le béton substitué. Cette formule permet d'évaluer les émissions finales après substitution, conformément aux principes d'Analyse de Cycle de vie (AVC) et aux recommandations de l'IEA [31].

$$R_{duction}(\%) = \frac{CO_{2reduit}}{M_c \times FE_c} \times 100 \quad (2.23)$$

Où : Réduction est le pourcentage de réduction de CO₂. Cette formule permet d'exprimer la performance de la substitution en termes relatifs et de comparer l'efficacité de chaque taux de substitution [31].

2.7 EVALUATION DU COUT DE REVIENT DU BETON

L'évaluation du coût de revient vise à analyser l'impact économique de la substitution partielle du ciment par le biocharbon dans la formulation du béton. Elle permet de vérifier si la réduction de la quantité de ciment, principal constituant coûteux et émetteur de CO₂, entraîne ou non une variation significative du coût de production du béton.

a) Principe de l'évaluation

Le principe de l'évaluation repose sur un calcul comparatif du coût des constituants nécessaires à la fabrication de 1 m³ de béton, pour le béton témoin et les bétons substitués. Le coût total du béton est obtenu par la somme des coûts unitaires de chaque constituant, déterminés à partir de leurs quantités issues de la formulation et de leurs prix unitaires respectifs.

b) Mode opératoire

Le mode opératoire adopté comprend les étapes suivantes :

- Détermination des quantités de ciment, granulats, eau et biocharbon pour 1 m³ de béton, à partir de la formulation selon la méthode de Dreux–Gorisse ;
- Application des taux de substitution du ciment par le biocharbon (1 %, 3 %, 5 %, 7 % et 9 %) en ajustant uniquement la quantité de ciment et du biocharbon ;
- Calcul du coût de chaque constituant par multiplication de sa quantité par son prix unitaire ;
- Détermination du coût total du béton par la somme des coûts de l'ensemble des constituants.

c) Expression des résultats

Les résultats sont exprimés en coût de revient pour 1 m³ de béton, en dollars américains, pour le béton témoin et les bétons substitués. Cette méthode permet d'évaluer l'effet économique de la substitution partielle du ciment par le biocharbon et de juger de la viabilité économique des formulations étudiées.

2.8 PROGRAMME EXPÉRIMENTAL

L'expérimentation menée dans ce travail vise à étudier l'influence de l'incorporation du biocharbon, en substitution partielle du ciment Portland, sur les propriétés mécaniques d'un béton ordinaire à faible empreinte carbone. Le choix d'introduire le biocharbon repose sur les résultats issus de la littérature, qui indiquent que son taux de substitution ne doit pas dépasser 5 % afin de préserver les performances mécaniques tout en apportant un gain environnemental notable. Dans ce travail, nous avons également étudié des taux de substitution supérieurs, à savoir 7 % et 9 %, afin de vérifier si ces ajouts pouvaient encore offrir un gain environnemental tout en conservant des performances mécaniques acceptables.

Dans ce cadre, cinq pourcentages de substitution ont été retenus : 1 %, 3 %, 5 %, 7 % et 9% de la masse du ciment, auxquels s'ajoute une formulation témoin sans biocharbon (0 %). Le biocharbon utilisé est issu de résidus fins de pyrolyse de biomasse, collectés dans des sacs commerciaux, broyés puis tamisés à 0,08 mm pour obtenir une poudre homogène. Avant son incorporation, il est conditionné dans des sacs hermétiques. Le principe consiste à employer ce matériau comme addition minérale partielle, en remplacement du ciment Portland (CEM IV/B 42.5 Cimerwa), de manière à réduire la consommation de clinker et donc l'empreinte carbone du béton.

Le mode opératoire adopté est le suivant : après préparation du biocharbon (collecte, broyage, tamisage et stockage), celui-ci est introduit dans la formulation en substitution d'une partie du ciment, tout en maintenant constant le rapport granulats/eau. Un superplastifiant est ajouté afin de compenser l'absorption d'eau supplémentaire. Le mélange s'effectue d'abord à sec entre ciment, granulats et biocharbon, puis l'eau sont incorporés progressivement jusqu'à obtention d'une pâte homogène. La mise en forme se fait par coulage dans des moules cylindriques avec

vibration légère ; les éprouvettes sont démoulées après 24 heures et placées en cure humide jusqu'aux âges d'essais de 7 et 28 jours.

Pour garantir la comparabilité entre les différentes formulations, chaque série a été confectionnée selon le même protocole. Ainsi, pour le béton témoin (0 %), neuf éprouvettes cylindriques ont été réalisées, dont trois testées à 3 jours, trois autres à 21 jours et trois dernières à 28 jours. Pour chaque taux de substitution (1 %, 3 %, 5 %, 7 % et 9%), neuf éprouvettes ont également été préparées, soit trois pour les essais à 3 jours, trois pour les essais à 21 jours et trois pour les essais à 28 jours. L'ensemble de la campagne expérimentale comprend donc 9 éprouvettes témoins et 45 éprouvettes d'essai, soit un total de 54 cylindres.

Les essais prévus portent, d'une part, sur l'état frais avec la mesure de la consistance au cône d'Abrams pour évaluer l'ouvrabilité et la maniabilité, et d'autre part, sur l'état durci avec la mesure de la densité apparente et la détermination de la résistance à la compression simple à 3, 7 et 28 jours selon la norme NF EN 12390-3.

Ce programme permettra ainsi de comparer, pour chaque taux de substitution, les résultats obtenus avec ceux du béton témoin, et d'analyser l'évolution de la densité ainsi que des performances mécaniques en fonction de l'incorporation du biocharbon, dans le but de dégager un seuil optimal conciliant réduction d'empreinte carbone et maintien des propriétés structurales.

2.9 CONCLUSION PARTIELLE

De la présentation des matériaux utilisés à la caractérisation des bétons étudiés, ce chapitre a mis en évidence, d'une part, les essais de caractérisation du biocharbon et des granulats, et d'autre part, la démarche méthodologique retenue pour la formulation des bétons à faible empreinte carbone. La méthode de Dreux-Gorisse a servi de base à la composition, tandis que les essais réalisés à l'état frais et durci, complétés par le programme expérimental, permettent d'évaluer l'influence de la substitution partielle du ciment par le biocharbon. Par ailleurs, une évaluation du coût de production des différents bétons élaborés a également été réalisée afin d'apprécier leur faisabilité économique.

Chapitre 3 PRESENTATION ET INTERPRETATION DES RESULTATS

3.1 INTRODUCTION

Ce chapitre présente les résultats expérimentaux obtenus à l'issue des essais réalisés en laboratoire. Il porte sur la caractérisation des matériaux constitutifs du béton, notamment le ciment, le sable et les graviers, ainsi que sur l'analyse des formulations de bétons à faible empreinte carbone intégrant une incorporation partielle de biocharbon. Les performances des bétons contenant du biocharbon sont comparées à celles des bétons témoins, à l'état frais et à l'état durci, afin d'évaluer l'influence de cette incorporation sur le comportement du matériau. Enfin, une analyse comparative est complétée par une évaluation du coût de revient pour un mètre cube de béton, dans une optique de faisabilité technique et économique.

3.2 CARACTERISATION DES MATERIAUX

Dans cette partie nous présentons les résultats de l'analyse granulométrique, le module de finesse, le degré de propreté du sable, les masses volumiques absolue et apparente et les résultats de l'essai Los Angeles.

3.2.1 Analyse granulométrique

L'analyse granulométrique a été réalisée conformément à la norme NF P 18-560 [8]. Le but poursuivi était de déterminer la composition granulométrique des granulats ainsi que la courbe granulométrique correspondant à chacun d'eux. La *Figure 3-1* qui présente les courbes granulométriques combinés pour le béton quartenaire.

COURBES GRANULOMETRIQUE DU BETON QUARTENAIRE

La distribution granulométrique des sables et graviers est illustrée par les courbes suivantes ;

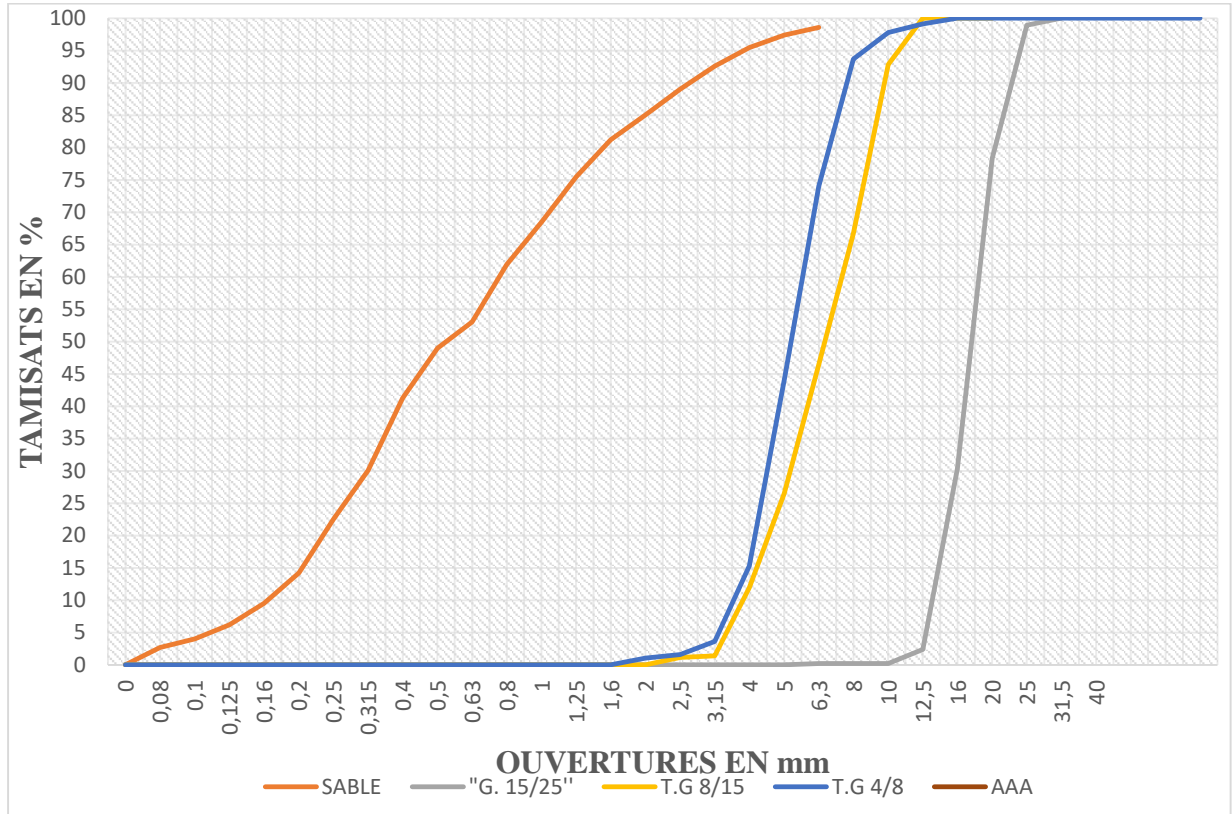


Figure 3-1 Courbes granulométrique

La courbe granulométrique du sable représentée en orange, montre une bonne répartition des grains selon leurs tailles. La partie inférieure de la courbe correspond aux grains fins, tandis que la partie supérieure représente les grains plus grossiers. Le passage progressif entre ces deux zones indique une distribution continue des dimensions des particules, ce qui est favorable à une bonne compacité du matériau.

Les courbes granulométriques des graviers 4/8 mm, 8/15 mm et 15/25 mm présentent une complémentarité importante pour la formulation du béton quaternaire. Le gravier 4/8 mm, plus fin, permet de remplir les vides entre les grains plus gros, ce qui améliore la densité et la facilité de mise en œuvre du béton. Le gravier 8/15 mm assure un bon équilibre entre résistance et maniabilité, tandis que le gravier 15/25 mm contribue principalement à la résistance globale du

béton. L'utilisation conjointe de ces trois fractions permet d'obtenir un béton plus homogène, plus durable et moins sensible à la ségrégation.

3.2.2 Coefficient d'uniformité Cu et de courbure Cz

A partir des résultats de l'analyse granulométrique, les coefficients d'uniformité (Cu) et de courbe (Cz) ont été calculés afin d'apprécier la quantité de la granulométrie des granulats. Les valeurs obtenues sont inscrites dans le *Tableau 3-1* ;

Tableau 3-1 coefficient d'uniformité et de courbure

Désignation	Coefficient d'uniformité Cu	Coefficient de courbure Cz
Sable	4,658	0,112
Graviers concassés 15/25	1,575	1,008
Graviers concassés 8/15	1,989	0,992
Graviers concassés 4/8	1,351	1,016

À la lumière du *Tableau 3-1*, il ressort que le coefficient d'uniformité des graviers 15/25, 8/15 et 4/8 sont inférieurs à 2, ce qui indique une granulométrie serrée ou uniforme. En revanche, pour celui du sable, le coefficient d'uniformité est supérieur à 2, traduisant une granulométrie étalée ou variée.

En ce qui concerne le coefficient de courbure, la valeur de Cz des graviers 15/25 et 4/8 sont comprises entre 1 et 3, ce qui caractérise une granulométrie bien graduée. Pour le sable et le graviers 8/15 la valeur de Cz est inférieure à 1, indiquant une granulométrie mal graduée.

3.2.3 Module finesse

Le module de finesse obtenu est de 2,455. Cette valeur, comprise entre 2,2 et 2,8, conduit à conclure que le sable étudié est un bon sable, adapté à la confection du béton.

3.2.4 Degré de propreté du sable

Le Tableau ci-dessous montre les différents résultats obtenus après l'essai ;

Tableau 3-2 Equivalence sables

Moyenne lecture à la règle	94,763
Moyenne lecture au piston	96,874
Moyenne des moyennes	95,818

L'évaluation du degré de propreté du sable utilisé dans cette étude montre une valeur de 95,818 %. Cette valeur, largement supérieure au seuil de 80 %, confirme que le sable est très propre et convient parfaitement à la réalisation d'un béton de haute qualité.

3.2.5 Masse volumique de granulats

Les valeurs des masses volumiques absolues et apparentes des granulats sont présentées dans le *Tableau 3-3*.

Tableau 3-3 Valeurs des masses volumiques des granulats

Désignation	Sable	Gravier (4/8)	Gravier (8/15)	Gravier (15/25)
Masse volumique absolue (g/cm ³)	2,597	2,758	2,728	2,439
Masse volumique apparente (g/cm ³)	1,505	1,317	1,224	1,254

Les valeurs présentées dans le tableau *Tableau 3-3* indique que les masses volumiques absolues des granulats étudiés se situent entre 2 g/cm³ et 3 g/cm³, ce qui permet de les classer parmi les granulats courants.

3.2.6 Essai de consistance

Les résultats de l'essai de consistance normale montrent une diminution progressive de l'enfoncement de la sonde de Vicat avec l'augmentation de la teneur en eau pour une masse de ciment constante de 500 g. Les enfoncements mesurés passent successivement de 19 mm (31 g d'eau) à 12 mm (32 g), 10 mm (33 g), 8 mm (34 g) et atteignent 5 mm pour une teneur en

eau de 35 g. La consistance normale, définie par un enfoncement de 6 ± 1 mm conformément à la norme NF EN 196-3, est ainsi obtenue lors du cinquième essai. Ce résultat permet de retenir une teneur en eau de 35 g comme valeur de référence, correspondant à un rapport eau/ciment $E/C = 35/500 = 0,07$, qui caractérise la consistance normale de la pâte de ciment étudiée.

3.2.7 Essai de Los Angeles

Le *Tableau 3-4* présente les résultats de l'essai Los Angeles réalisés sur les différentes classes granulométriques étudiées.

Tableau 3-4 Résultats Los Angeles

LOS ANGELES	
Graviers	Valeurs du coefficient LA
Graviers 15/25	11,84%
Graviers 8/15	15,92%
Graviers 4/8	18,08%

Les résultats de l'essai Los Angeles montrent que les graviers 15/25 présentent une très bonne qualité mécanique, tandis que les fractions 8/15 et 4/8 offrent des performances satisfaisantes, ce qui rend l'ensemble des granulats apte à la fabrication d'un béton de qualité.

3.2.8 Taux d'absorption d'eau

Les tableaux ci-après montrent les taux d'absorption des graviers déterminés après l'essai ;

Tableau 3-5 Taux d'absorptions d'eau

TAUX D'ABSORPTIONS D'EAU	
Graviers	Valeurs du taux d'absorptions
Graviers 15/25	1,8%
Graviers 8/15	1%
Graviers 4/8	1,8%

Ces résultats mettent en évidence que ces granulats retiennent peu d'eau, ce qui traduit leur densité et leur stabilité, des qualités essentielles pour la réalisation d'un béton durable et de haute performance.

3.3 RESULTATS DE LA FORMULATION DU BETONS

Dans cette partie, sont présentés les résultats de la formulation des bétons réalisée à l'aide de la méthode de Dreux-Gorisse. Cette méthode a permis de déterminer les dosages des différents constituants pour une résistance caractéristique visée de 20 MPa. La section présente également la substitution partielle du ciment par le biocharbon, dans le cadre du développement d'un béton à faible empreinte carbone.

3.3.1 Données de base

Le *tableau 3-6* présente les données de base qui ont servi dans cette étude

Tableau 3-6 Données de base

FORMULATION A 20Mpa	
Désignation	Valeurs
Nature de l'ouvrage	Ouvrage ferraillé
Classe vrai du ciment	38,5 Mpa
Consistance	Plastique
Résistance visée à 28jours	20Mpa
Dimension du plus gros granulat	25 mm

3.3.2 Calcul des dosages

Dans cette section, il sera question de présenter les résultats des dosages en éléments constitutifs du béton notamment le dosage en ciment, le dosage en eau, et enfin le dosage en granulats.

3.3.2.1 Dosage en eau et en ciment

La formule (2.11), associée à la Figure 2-1, a permis de déterminer les dosages en ciment et en eau pour le béton étudié. Les valeurs correspondantes sont récapitulées dans le *Tableau 3-7, 3-8, 3-9, 3-10, 3-11, 3-12*.

Tableau 3-7 Dosage en eau et en ciment pour le Béton témoins

Désignations	Valeurs
Dosage en ciment (kg/m ³)	400
Dosage en eau (kg)	210,5

Ce tableau présente la formulation de référence sans biocharbon. Il sert de base comparative pour évaluer l'impact des substitutions futures. Le dosage en ciment est fixé à 400 kg/m³ avec un rapport Eau/Ciment optimal de 210,5l/m³ pour garantir la résistance maximale du témoin.

Tableau 3-8 Dosage en eau et en ciment pour le Béton par substitutions 1%

Désignations	Valeurs
Dosage en ciment (kg/m ³)	396
Dosage en eau (kg)	208,4

Ce tableau détaille la première variante où 4kg/m³ de ciment sont remplacés par du biocharbon. Cette faible substitution vise à observer les premières modifications de la pâte de ciment sans altérer significativement le squelette granulaire initial.

Tableau 3-9 Dosage en eau et en ciment pour le Béton par substitutions 3%

Désignations	Valeurs
Dosage en ciment (kg/m ³)	388
Dosage en eau (kg)	204,2

Ce dosage montre une substitution de 12kg/m³ de ciment. On note ici un ajustement de la quantité d'eau pour maintenir l'ouvrabilité, car l'introduction croissante de particules fines de biocharbon commence à influencer la demande en eau du mélange.

Tableau 3-10 Dosage en eau et en ciment pour le Béton par substitutions 5%

Désignations	Valeurs
Dosage en ciment (kg/m ³)	380
Dosage en eau (kg)	200

Ce tableau présente le dosage à 5%, considéré comme un seuil critique dans l'étude. La réduction du ciment atteint 20kg/m³, compensée par le biocharbon. L'explication des calculs ici montre l'équilibre entre la réduction de l'empreinte carbone et le maintien des propriétés physiques.

Tableau 3-11 Dosage en eau et en ciment pour le Béton par substitutions 7%

Désignations	Valeurs
Dosage en ciment (kg/m ³)	372
Dosage en eau (kg)	195,7

À ce stade de substitution (28kg/m³ de ciment remplacés), le tableau met en évidence l'augmentation du volume des fines. Le dosage est calculé pour vérifier si la matrice cimentaire peut encore lier efficacement les granulats malgré la baisse du liant hydraulique.

Tableau 3-12 Dosage en eau et en ciment pour le Béton par substitutions 9%

Désignations	Valeurs
Dosage en ciment (kg/m ³)	364
Dosage en eau (kg)	191,5

Ce dernier tableau présente la formulation la plus écologique avec la plus forte réduction de ciment (36kg/m³). Les calculs de dosage ici visent à maximiser l'empreinte carbone positive tout en surveillant le volume d'eau de gâchage nécessaire à l'hydratation des 364kg/m³ de ciment restants.

3.3.3 Dosage en granulats

Le dosage des granulats a été déterminé à partir des proportions de sable et de graviers issues de la courbe de référence OAB. Les coordonnées correspondantes de cette courbe sont présentées dans le *Tableau 3-13*.

Tableau 3-13 Coordonnées de la courbe de référence OAB

Désignation	O	A	B
X (mm)	0	11,25	25
Y (%)	0	53,14	100

Après la présentation des dosages granulaires selon les références OAB, les courbes granulométriques sur la *Figure3-1* montrent la manière dont les différents granulats se répartissent dans les bétons formulés. Elles permettent de vérifier la continuité de la granulométrie et la conformité aux domaines recommandés. Les points caractéristiques A et B mettent en évidence l'équilibre entre les granulats fins et grossiers, ce qui favorise une bonne compacité du béton et une cohésion satisfaisante de la matrice. Ces résultats confirment que les dosages granulaires choisis sont adaptés et influencent directement le comportement mécanique des bétons étudiés.

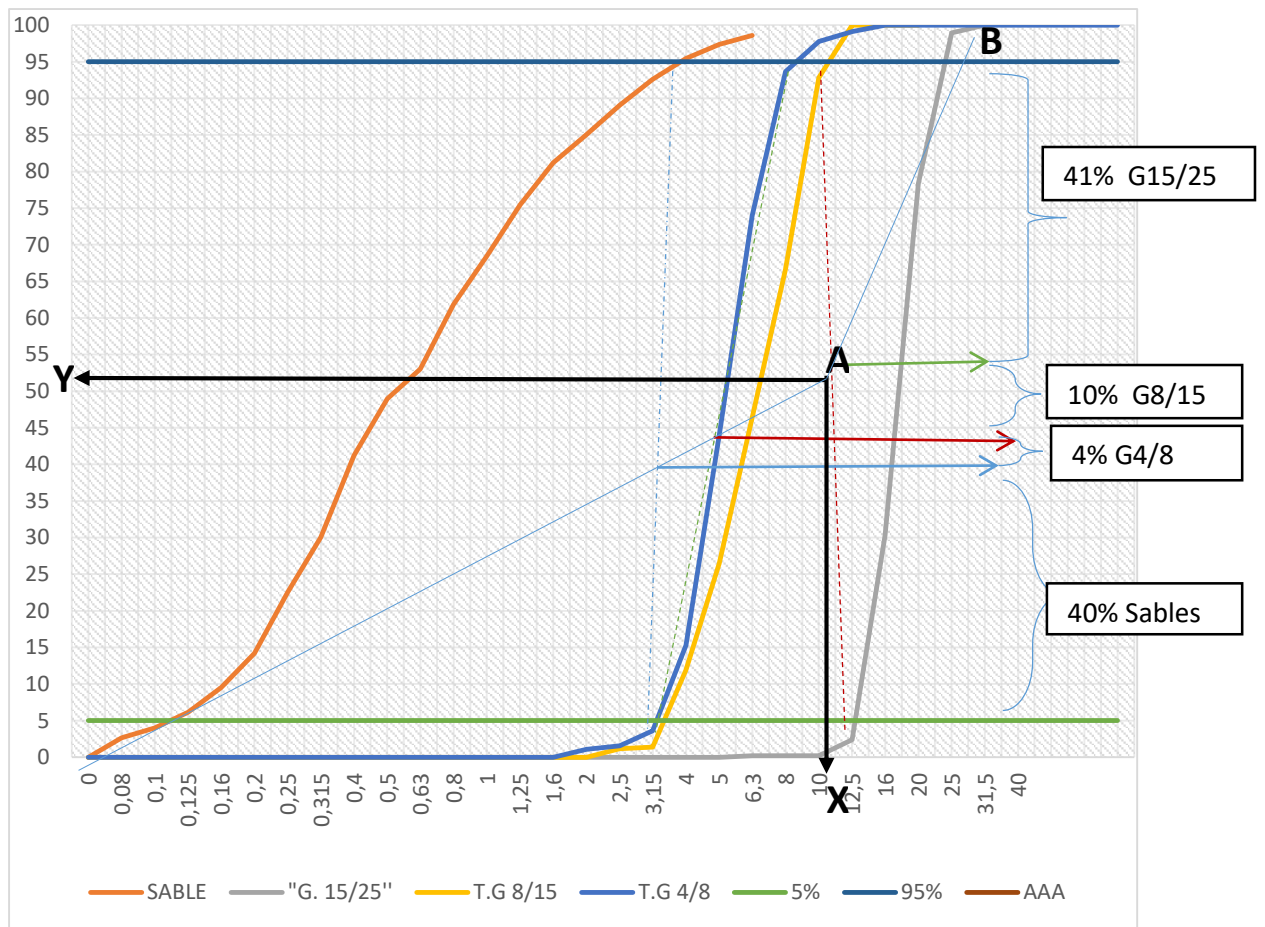


Figure 3-1 Répartition des granulats du béton quaternaire

Il ressort de la *Figure 3-1* que le sable représente 40 % de la composition du béton, tandis que le gravier 4/8, le gravier 8/15 et le gravier 15/25 y contribuent respectivement à hauteur de 4 %, 10 % et 41 %.

À partir des coordonnées de la courbe de référence, nous pouvons facilement déduire le dosage massique des constituants du béton. Le *Tableau 3-14* ci-après présente les différents dosages massiques obtenus.

Tableau 3-14 Dosage massique

Bétons	Sable 0/4		Gravier 4/8		Gravier 8/15		Gravier 15/25	
	%	Dosage massique (kg/ m ³)	%	Dosage massique (kg/ m ³)	%	Dosage massique (kg/ m ³)	%	Dosage massique (kg/ m ³)
BC20-1	40	773,36	4	80,216	10	198,57	41	796,49

Le dosage massique adopté pour les différentes formulations permet d'assurer une répartition équilibrée des constituants du béton. Les valeurs retenues respectent les proportions issues de la méthode de formulation et garantissent la cohérence entre les bétons étudiés. Cette base de dosage constitue ainsi un élément essentiel pour l'analyse fiable des propriétés du béton à l'état frais et à l'état durci.

3.4 CARACTERISTIQUE DES BETONS

Cette partie est dédiée à l'évaluation des propriétés des bétons à l'état frais, notamment l'ouvrabilité et la masse volumique, à partir des essais réalisés.

3.4.1 Caractéristique à l'état frais

Cette section présente les résultats de l'essai d'affaissement au cône d'Abrams ainsi que la masse volumique du béton à l'état frais.

3.4.1.1 Affaissement au cône d'Abrams

L'essai d'affaissement au cône d'Abrams a permis d'évaluer l'ouvrabilité des bétons élaborés. Le *tableau 3-15* suivant présente les valeurs d'affaissement mesurées pour le béton témoin et les bétons incorporant du biocharbon à différents taux de substitution.

Tableau 3-15 Affaissement au cône d'Abrams

FORMULATION BETON TEMOINS		
Désignation	Valeur de l'affaissement	Quantité d'eau ajoutée
BC	5 mm	18%
BD 1%	5,4 mm	9%
BD3%	6 mm	10%
BD5%	5,7 mm	16%
BD7%	7 mm	25%
BD9%	6 mm	24%

Les résultats montrent une diminution progressive de l'affaissement avec l'augmentation du taux de substitution du ciment par le biocharbon. Cette évolution traduit l'influence de la porosité et de la capacité d'absorption d'eau du biocharbon sur l'ouvrabilité du béton. Ce résultat met en évidence que tous les bétons présentent un affaissement compris entre 5 et 9 cm. Ces résultats traduisent un comportement plastique du béton, ce qui le rend approprié pour des ouvrages tels que les semelles coffrées, les murs de soutènement, les planchers, les dalles, les poteaux et les voiles qui permet de maintenir une consistance acceptable pour l'ensemble des formulations étudiées.

Afin de mieux visualiser l'évolution de l'ouvrabilité en fonction du taux de substitution, les résultats d'affaissement sont représentés sous forme d'histogrammes dans La *Figure 3-7*.

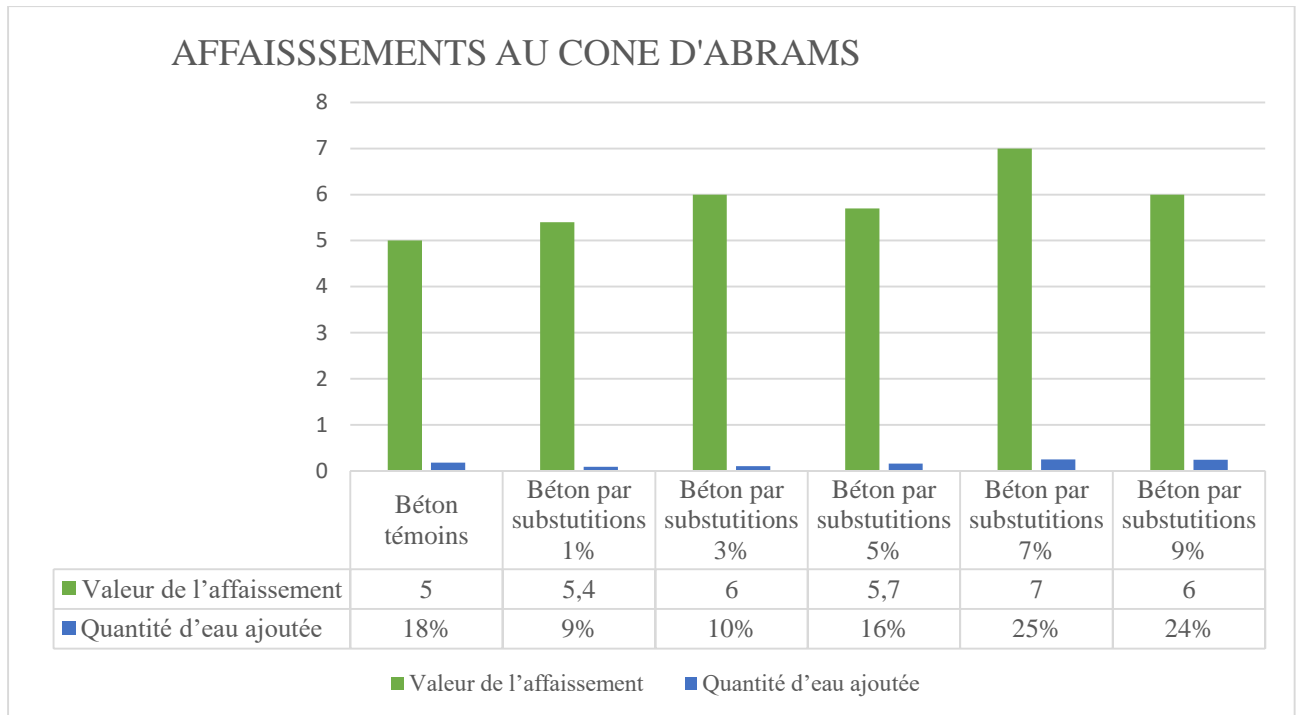


Figure 3-2 Valeur de l'affaissement cône d'Abrams

3.4.1.2 La masse volumique du béton frais

Le tableau 3-14 regroupe les valeurs de masse volumique mesurées à l'état frais pour les différentes formulations de béton.

Tableau 3-16 masse volumique à l'état frais

BETONS	Masse volumique à l'etat frais	Unité
BC	2318,973	kg/m ³
BD 1%	2352,458	kg/m ³
BD 3%	2213,904	kg/m ³
BD 5%	2342,661	kg/m ³
BD 7%	2320,424	kg/m ³
BD 9%	2361,788	kg/m ³

L'analyse de ce tableau montre que l'ensemble des bétons étudiés possède une masse volumique comprise entre 2 000 et 2 600 kg/m³. Au regard de ces valeurs, ces bétons

peuvent être classés parmi les bétons courants, également appelés bétons à masse volumique normale.

Les histogrammes suivants illustrent l'évolution de la masse volumique du béton à l'état frais selon les différentes formulations.

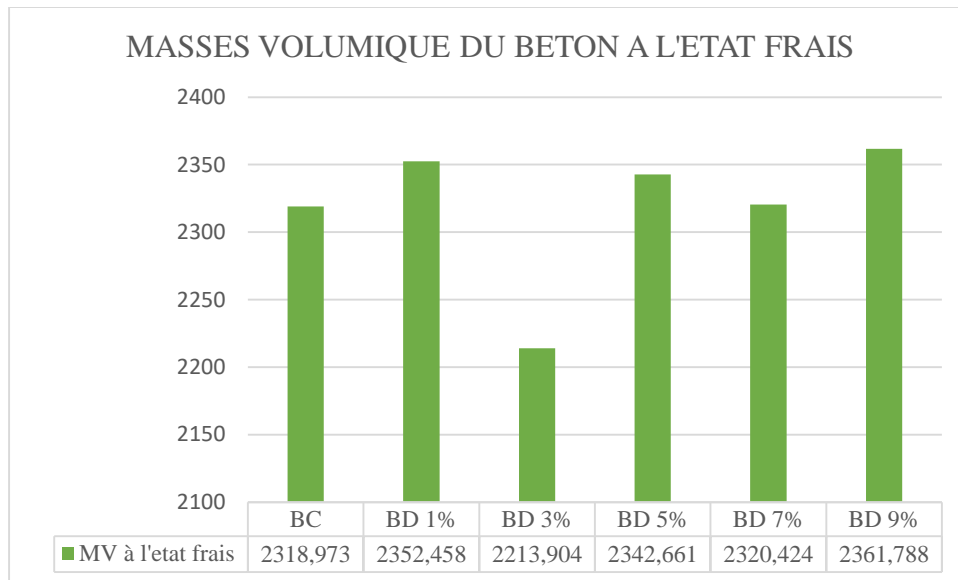


Figure 3-3 Masse volumique des bétons frais

3.4.2 Caractéristique à l'état durci

Cette section présente les résultats de la masse volumique du béton à l'état durci ainsi que les résistances à la compression mesurées sur des éprouvettes cylindriques de 16 × 32 cm après 3,7 et 28 jours de cure par immersion.

3.4.2.1 Masse volumique du béton

Le tableau ci-dessous regroupe les valeurs de la masse volumique du béton à l'état durci mesurées pour l'ensemble des formulations.

Tableau 3-17 masse volumique à l'état durci

BETONS	Masse volumique à l'etat durci	Unité
BC	1217,696	kg/m ³
BD 1%	1367,109	kg/m ³
BD 3%	1205,774	kg/m ³
BD 5%	1307,707	kg/m ³
BD 7%	1301,953	kg/m ³
BD 9%	1269,920	kg/m ³

L'analyse de ce tableau indique une légère diminution de la masse volumique à l'état durci avec l'augmentation du taux de biocharbon. Cette évolution est liée à la structure poreuse du biocharbon et à la réduction de la quantité de ciment. Néanmoins, les valeurs restent dans des plages compatibles avec celles des bétons ordinaires, confirmant que la substitution n'altère pas significativement la compacité globale du béton. Ces valeurs permettent de classer les bétons confectionnés dans la catégorie des bétons courants à masse volumique normale.

La représentation graphique de ces résultats sous forme d'histogrammes permet de comparer plus aisément les masses volumiques à l'état durci des différents bétons étudiés.

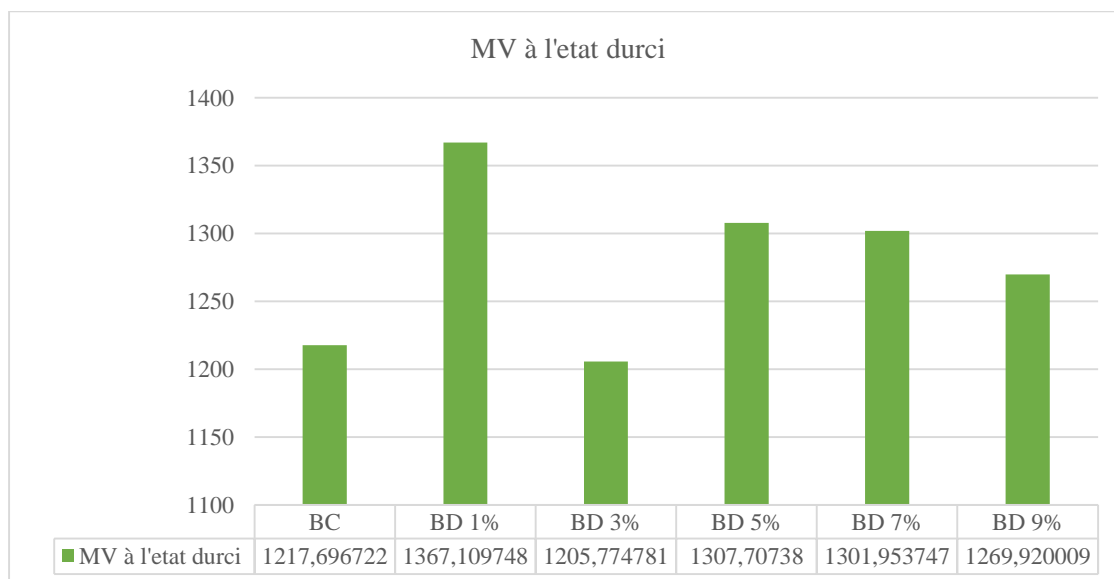


Figure 3-4 Masse volumique à l'état durci

3.4.2.2 Résistance en compression

Le *Tableau 3-18* présente les résultats des essais de résistance à la compression obtenus pour les différents bétons étudiés à 3,7 et 28 jours.

Tableau 3-18 Résistance à la compressions

BETON	Unité	BC	BD1%	BD3%	BD5%	BD7%	BD9%
Résistance à 3jours	Mpa	11,629	8,776	8,379	9,038	7,838	8,545
Résistance à 7jours	Mpa	13,933	10,528	13,411	14,465	12,544	14,403
Résistance à 28jours	Mpa	21,261	15,574	20,251	21,842	18,942	21,749

La lecture du *Tableau 3-18* des résultats de résistance à la compression des bétons Bc et BD à 3, 7 et 28 jours met en évidence une augmentation progressive de la résistance avec l'âge pour l'ensemble des formulations étudiées. À 3 jours, le béton de référence Bc présente la résistance la plus élevée (11,629 MPa), tandis que les bétons BD, contenant du biocharbon en substitution partielle du ciment, affichent des résistances inférieures comprises entre 7,838 MPa pour le BD7 % et 9,038 MPa pour le BD5 %, soit des diminutions allant de 22,3 % à 32,6 % par rapport à Bc, traduisant un ralentissement du développement de la résistance aux jeunes âges lié à l'introduction du biocharbon. À 7 jours, toutes les formulations présentent une augmentation notable de la résistance ; le béton Bc atteint 13,933 MPa, tandis que les bétons BD présentent des valeurs comprises entre 10,528 MPa et 14,465 MPa. Les formulations BD5 % (14,465 MPa) et BD9 % (14,403 MPa) développent des résistances légèrement supérieures à celle du béton de référence, alors que les autres bétons substitués restent proches, indiquant une amélioration progressive du comportement mécanique avec l'âge. À 28 jours, le béton Bc atteint une résistance de 21,261 MPa, tandis que les bétons BD présentent des résistances variant de 15,574 MPa à 21,842 MPa ; les bétons BD5 % (21,842 MPa) et BD9 % (21,749 MPa) montrent des résistances supérieures à celle du béton de référence, avec des gains respectifs de 2,7 % et 2,3 %, tandis que le BD3 % développe une résistance proche (20,251 MPa) et que les bétons BD1 % et BD7 % restent inférieurs, avec des pertes de 26,7 % et 10,9 %. Ces résultats mettent en évidence l'existence d'un taux optimal de substitution du ciment

par le biocharbon compris entre 5 % et 9 %, permettant de maintenir, voire d'améliorer, les performances mécaniques du béton tout en contribuant à la réduction de la quantité de ciment utilisée, et donc à la diminution de l'empreinte carbone des formulations étudiées. En conclusion, bien que l'incorporation du biocharbon entraîne une baisse de la résistance aux jeunes âges, certains taux de substitution permettent, à long terme, d'obtenir des résistances comparables ou supérieures à celles du béton de référence, confirmant la pertinence de cette approche dans une logique de béton à faible empreinte carbone.

Les histogrammes suivants illustrent l'évolution des résistances et facilitent la comparaison entre le béton témoin et les bétons substitués.

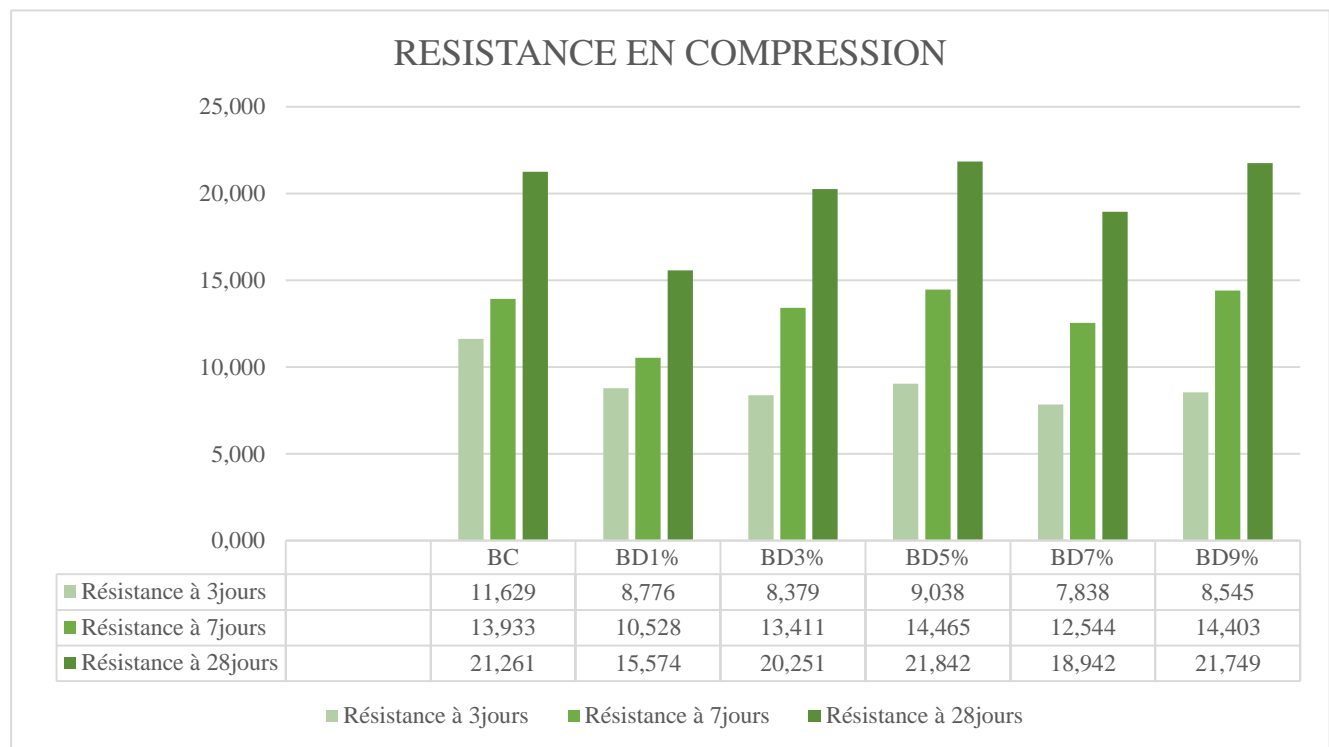


Figure 3-5 Résistance à la compression à 3,7 et 28jours

3.5 SUBSTITUTIONS PARTIELLE DU CIMENT ET DETERMINATION DE LA QUANTITE REDUCTION DE CARBONE

Le *Tableau 3-19* montre la quantification du dosage en ciment par substitutions et celui du carbone réduit, déterminer grâce aux formules (2,20) ;(2,21) ;(2,22) ;(2,23)

Tableau 3-19 Substitution du ciment et détermination de la quantité réduite de carbone

Formulation	Dosage ciment initial (kg/m ³)	Taux de substitution (%)	Dosage ciment après substitution (kg/m ³)	Masse de ciment substituée (kg/m ³)	Facteur d'émission F _{Ec} (kg CO ₂ /kg)	CO ₂ réduit (kg CO ₂ /m ³)	Réduction (%)
BC	400	0	400	0	0,85	0	0
BD1	400	1	396	4	0,85	3,4	0,01
BD3	400	3	388	12	0,85	10,2	0,03
BD5	400	5	380	20	0,85	17	0,05
BD7	400	7	372	28	0,85	23,8	0,07
BD9	400	9	364	36	0,85	30,6	0,09

Les valeurs obtenues montrent une diminution progressive des émissions de CO₂ avec l'augmentation du taux de substitution. Cette réduction est directement liée à la baisse de la quantité de ciment utilisée dans les formulations, confirmant l'intérêt environnemental de l'introduction du biocharbon dans le béton.

3.6 EVALUATION DU COUT

Cette partie nous procédons à l'évaluation du coût de production d'un mètre cube de béton élaboré avec les différents taux d'incorporation de biocharbon considérés dans cette étude. Cette estimation est fondée sur la composition massique et/ou volumique de chaque

constituant, déterminée à partir des dosages obtenus lors de la phase de formulation. L'analyse porte exclusivement sur le coût des matériaux, à l'exclusion des frais liés au transport. Le *Tableau3-20* illustre les coûts unitaires correspondants à chaque formulation de béton étudiée.

Tableau 3-20 Evaluations du coûts

Bétons	Coûts
BC	129,97\$
BD 1%	131,44\$
BD 3%	134,38\$
BD 5%	137,32\$
BD 7%	140,27\$
BD 9%	143,21\$

La lecture du tableau 3-20 d'évaluation des coûts met en évidence un prix de revient de 129,97 \$ pour le béton témoin (BC), tandis que les bétons intégrant le biocharbon présentent des coûts croissants, allant de 131,44 \$ pour BD1 % à 143,21 \$ pour BD9 %. Cette évolution traduit une augmentation progressive du coût de production avec l'augmentation du taux de substitution du ciment par le biocharbon. Les données présentées en *Annexe. I* montrent que le coût de chaque formulation de béton est déterminé en tenant compte des prix unitaires des différents constituants (ciment, granulats, eau et biocharbon) ainsi que des quantités nécessaires pour la production d'un mètre cube de béton.

Dans le cas du biocharbon, le coût unitaire a été établi à partir d'un bassin de 15 litres, évalué à 1500 FC, soit 0,62 \$ (taux du marché : 2400 FC). Les écarts observés par rapport au béton de référence, compris entre 1,47 \$ et 13,24 \$, montrent que l'incorporation du biocharbon entraîne une augmentation du coût du béton. Cette tendance s'explique par le fait que, malgré la réduction de la quantité de ciment, l'ajout du biocharbon introduit un coût supplémentaire qui n'est pas entièrement compensé par l'économie réalisée sur le ciment.

L'ensemble des résultats montre ainsi que la substitution partielle du ciment par le biocharbon, dans les conditions étudiées, engendre un surcoût du béton. Toutefois, cette augmentation peut être justifiée par les avantages environnementaux associés, notamment la réduction de

l’empreinte carbone, ce qui s’inscrit dans une démarche de développement de bétons plus durables.

Les histogrammes ci-après permettent de visualiser la variation du coût de production du béton en fonction du taux de substitution du ciment par le biocharbon.

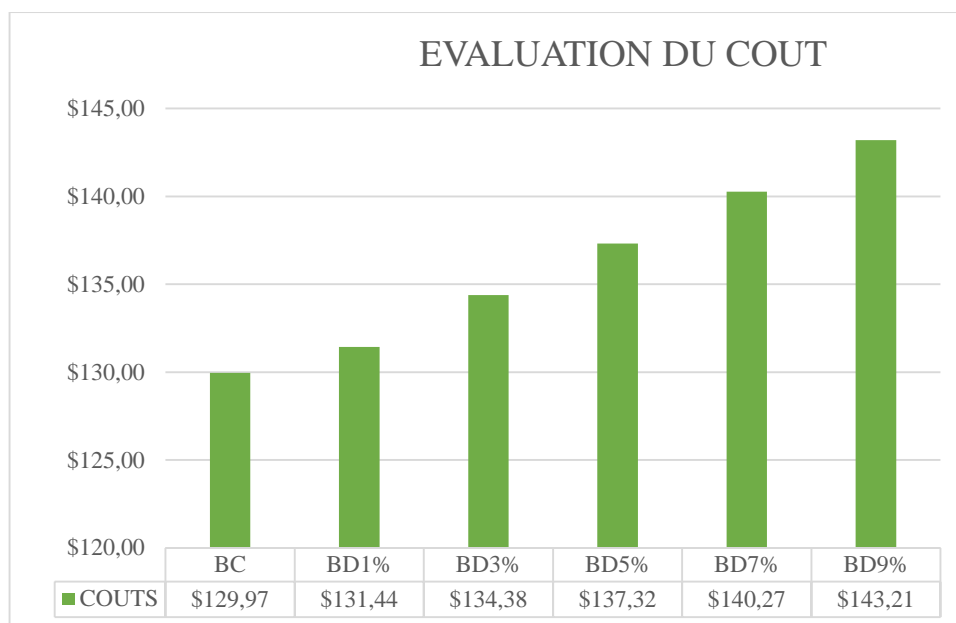


Figure 3-6 évaluations du cout de matériaux

3.7 CONCLUSION PARTIELLE

Le présent chapitre a porté sur la présentation et l’interprétation des résultats obtenus lors des expérimentations en laboratoire. Tout au long de ce dernier, il a été question de présenter les résultats relatifs à la caractérisation des matériaux utilisés, à la formulation des bétons ainsi qu’aux propriétés des bétons d’étude, à l’état frais et à l’état durci. Les analyses ont notamment permis d’évaluer l’influence de la substitution partielle du ciment par le biocharbon sur la résistance à la compression et sur le comportement général des bétons. Ce chapitre se conclut par une évaluation du prix de revient pour 1 m³ de chacun des bétons étudiés, montrant que l’introduction du biocharbon, jusqu’à 9 % de substitution, entraîne une augmentation du coût du béton. Toutefois, cette substitution permet de réduire la quantité de ciment utilisée et, par

conséquent, l’empreinte carbone, ce qui met en évidence un compromis entre performance environnementale et coût économique.

CONCLUSION GENERALE

Le présent travail a porté sur le développement d'un béton à faible empreinte carbone par la substitution partielle du ciment Portland par le biocharbon, dans le but de réduire l'impact environnemental du béton tout en conservant des performances mécaniques compatibles avec les exigences du génie civil. Cette étude s'inscrit dans un contexte de croissance rapide des besoins en infrastructures et par la nécessité de limiter les émissions de dioxyde de carbone liées à la production du ciment, principal contributeur à l'empreinte carbone du béton. Les matériaux entrant dans la composition du béton ont été caractérisés, avec une attention particulière portée au biocharbon issu de la pyrolyse de biomasses résiduelles, préparé sous forme de poudre fine. La formulation des bétons a été réalisée selon la méthode de Dreux-Gorisse, en maintenant constants les paramètres essentiels de formulation. Six bétons ont été étudiés : un béton témoin sans biocharbon et cinq bétons contenant respectivement 1 %, 3 %, 5 %, 7 % et 9 % de biocharbon en substitution partielle du ciment, afin d'analyser l'influence de ce matériau sur le comportement du béton à l'état frais et à l'état durci.

Les résultats expérimentaux ont montré que l'incorporation du biocharbon entraîne une diminution de la résistance à la compression aux jeunes âges, notamment à 3 jours. Cette baisse est attribuée à la réduction de la quantité de clinker actif et à la capacité d'absorption d'eau du biocharbon, qui ralentit le développement initial des résistances. Toutefois, cette tendance s'atténue avec l'âge du béton. À 7 et surtout à 28 jours, les résistances augmentent de manière significative pour toutes les formulations. Le béton témoin atteint une résistance à la compression de 21,261 MPa, tandis que les bétons contenant 5 % et 9 % de biocharbon développent respectivement des résistances de 21,842 MPa et 21,749 MPa, mettant en évidence l'existence d'un taux optimal de substitution permettant de maintenir les performances mécaniques tout en réduisant la consommation de ciment.

Les essais réalisés à l'état frais ont montré que l'ouvrabilité des bétons incorporant du biocharbon reste maîtrisable grâce à l'utilisation d'un superplastifiant, malgré l'augmentation de l'absorption d'eau liée à la structure poreuse du biocharbon. À l'état durci, l'évolution de la

densité et des résistances confirme que l'introduction raisonnée du biocharbon n'altère pas le comportement global du béton. En parallèle, une méthodologie de calcul fondée sur les facteurs d'émission du ciment a permis de déterminer, pour chaque taux de substitution, la quantité de dioxyde de carbone réduite par mètre cube de béton, mettant en évidence une diminution progressive de l'empreinte carbone avec l'augmentation du taux de biocharbon.

L'évaluation économique a montré que le prix de revient des bétons incorporant du biocharbon augmente progressivement par rapport au béton témoin (129,97 \$/m³), avec des coûts allant de 131,44 \$/m³ pour BD1 % à 143,21 \$/m³ pour BD9 %. Cette augmentation, malgré la réduction de la quantité de ciment, s'explique par le coût additionnel lié à l'introduction du biocharbon, qui n'est pas entièrement compensé par l'économie réalisée sur le ciment. Ces résultats mettent ainsi en évidence un compromis entre la réduction de l'empreinte carbone et l'augmentation du coût du béton, tout en restant compatibles avec les exigences techniques du génie civil. Cette approche demeure pertinente dans une perspective de durabilité, en favorisant la valorisation des déchets de biomasse et la réduction des émissions de CO₂.

En conclusion, la substitution partielle du ciment par le biocharbon, pour des taux compris entre 5 % et 9 %, constitue une solution pertinente pour le développement de bétons à faible empreinte carbone. Cette stratégie permet de concilier performances mécaniques et réduction de l'impact environnemental, malgré une augmentation du coût qui peut être justifiée par les bénéfices écologiques associés.

Toutefois, ce travail, limité à l'étude de certaines propriétés mécaniques et physiques, ouvre des perspectives de recherches futures portant sur la durabilité à long terme et l'optimisation des caractéristiques du biocharbon en vue de son intégration à plus grande échelle dans les bétons de génie civil.

Bibliographie

- [1] G. BTTIN, «Le beton ,mis au defi des enjeux environnementaux».
- [2] worldbank.org, «Annual production-based = emissions of carbon dioxide (CO2), measured in million tonnes,» [En ligne].
- [3] Asikikda, L'evaluation de l'impact de l'industriutrie du ciment sur l'environement , A l'Aide de l'analyse de cycle de vie(avc).
- [4] M. Kalenga, «Analyse de beton produits a Kinshasa ,Lubumbashi entre pratique locales et normes internationales,» 2019.
- [5] «Cimebeton, Les betons:formulation,fabrication et mise en oeuvre,» Paris,Janvier 2013.
- [6] A. M. E. & A. A. E. Hakim, «Etude d' amelioration des caracteristique physico-mecanique du beton de la centrale a beton de la societe SMC-Ouargla,» Universite Kasdi merbah Ouargla, algerie, 2021/2022.
- [7] M. GRACE, Cours de physique et technologie du béton, GOMA: ULPGL,fst, 2023-2024.
- [8] J. F. e. G. Dreux, Nouveau guide du beton et de ses consyituants, Paris: Eyrolles, 2006.
- [9] A. W. Muhindo, «Etude comparative de propriétés du béton formulé à base de granulats concassés et différents ciments de la ville de GOMA,» FST,ULPGL, GOMA, 2016-2017.
- [10] M. Venuat, «La pratique des ciments mortiers et betons,» 1976.
- [11] B.-B. B. Ines, « Influence de la distribution du squelette granulaire sur les propriétés du béton : application à un béton ordinaire,» ulpgl.
- [12] B. Joel, «Etude mécanique et économique du béton aux graviers concassés,» ULPGL.
- [13] 2. NM 10.1.008, «Eau de gâchage pour béton et mortier».
- [14] A. Neville, «Properties of concrete.Pearson Education.,» 2012.
- [15] EN 934-(2009), «Adjuvants pour beton , mortiers et coulis (partie2)».
- [16] M. Vénuat, « La pratique des ciments mortiers et bétons.,» 1976.

- [17] CIMBETON, «Bétons et Ouvrages D'art Tome 1,» chez Les ponts courants en béton.».
- [18] S-Laldji, « «Bétons et Ouvrages D'art Tome 1,» chez Les ponts courants en béton.».
- [19] B. M. H. & K. M. Cherif, «Effet de remplacement partiel de ciment par poudre de verre ou charbon actif à base de noyaude datte sur les performances du mortier.,» 2019/2020.
- [20] link.springer.com, « Impact of biochar on strength, durability, and carbon sequestration in cement based materials,» [En ligne].
- [21] nature.com, «Study of biochar in cementitious materials for developing green concrete composites,» [En ligne].
- [22] Link.springer.com, «Mixture of biochar as a green additive in cement-based materials for carbon dioxide sequestration,» [En ligne].
- [23] Cimebéton, «Les bétons:formulation, fabrication et mise en oeuvre,» paris, janvier,2013.
- [24] H.Kabbab, «les essais de laboratoire sur les matériaux de construction,laboratoire national de l'habitat et de la construction,» Algerie .
- [25] A. Masumbuko Murhonyi, «Contribution à l'étude comparative et analyse des différentes confections à base des différents types de ciments utilisés dans la ville de Goma,»,» ULPGL, Goma, 2021-2022.
- [26] Norme Française P 18-553, « Granulats-Préparation d'un échantillon pour essais, AFNOR,», septembre 1990.
- [27] F. Moncef et B. Mohamed, ««Caractérisations géotechniques des granulats de la carrière l'Euch en vue de leur utilisation comme matériaux pour béton,»,» Université de Mohamed El-, Algérie, 2022.
- [29] NF EN 196-3, Méthodes d'essais des ciments - Partie 3 : détermination du temps de prise et de la stabilité, Paris: Editions AFNOR, Août 1995.
- [31] I. E. AGENCY, «Tracking Industrial Energy Efficiency and CO2 Emissions,» OECD/IE, 2007.

[32] T. Roadmap, « Low-Carbon Transition in the Cement Industry, p. 45,» IEA, Paris, 2018.

[33] JUnit.org. [En ligne]. Available: <http://www.junit.org>. [Accès le 2 Janvier 2019].

ANNEXES

Annexe A. ANALYSE GRANULOMETRIQUE

1. SABLE				
Prise d'essai: 3000g				
Tamis	Refus	Refus cum	Refus cum en %	Tamisat en %
6,3	42	42	1,4	98,6
5	37	79	2,633	97,366
4	58	137	4,566	95,433
3,15	85	222	7,4	92,6
2,5	107	329	10,966	89,033
2	120	449	14,966	85,033
1,6	115	564	18,8	81,2
1,25	173	737	24,566	75,433
1	227	964	32,133	67,867
0,8	180	1144	38,133	61,866
0,63	265	1409	46,966	53,033
0,5	122	1531	51,033	48,966
0,4	232	1763	58,766	41,233
0,315	336	2099	69,966	30,033
0,25	225	2324	77,466	22,533
0,2	250	2574	85,8	14,2
0,16	139	2713	90,433	9,566
0,125	102	2815	93,833	6,166
0,1	65	2880	96	4
0,08	40	2920	97,333	2,666
				MF
100* sommes de Refus cum en % de tamis(5+2,5+1,25+0,63+0,31				2,455

2.GRAVIER CONCASSE 15/25				
Prise d'essai: 3000g				
Tamis	Refus	Refus cum	Refus cum en %	Tamisat en %
31,5	32	32	1,066	98,933
25	617	649	21,633	78,366
20	1441	2090	69,666	30,333
16	838	2928	97,6	2,4
12,5	66	2994	99,8	0,2
10	0	2994	99,8	0,2
3.GRAVIER CONCASSE 8/15				
Prise d'essai: 3000g				
Tamis	Refus	Refus cum	Refus cum en %	Tamisât en %
12,5	26	26	0,866	99,133
10	41	67	2,233	97,766
8	123	190	6,333	93,666
6,3	590	780	26	74
5	900	1680	56	44
4	861	2541	84,7	15,3
3,15	351	2892	96,4	3,6
2,5	61	2953	98,433	1,566
2	15	2968	98,933	1,066
3.GRAVIER CONCASSE 4/8				
Prise d'essai: 3000g				
Tamis	Refus	Refus cum	Refus cum en %	Tamisât en %
15	215	215	7,166	92,833
12,5	786	1001	33,366	66,633
10	606	1607	53,566	46,433
8	598	2205	73,5	26,5
6,3	437	2642	88,066	11,933
4	316	2958	98,6	1,4
3,15	7	2965	98,833	1,167

Annexe B. MASSE VOLUMIQUE APPARENTE DE GRANULATS

MASSE VOLUMIQUE APPARENTE		
1. SABLE		
RECIPIENT 1	Masse (g)	4354
	Volume (cm ³)	955,55
RECIPIENT 2	Masse (g)	4354
	Volume (cm ³)	955,55
RECIPIENT 3	Masse (g)	4354
	Volume (cm ³)	955,55
MOYENNE		1,505
2. GRAVIERS CONCASSES 15/25		
RECIPIENT 1	Masse (g)	4354
	Volume (cm ³)	955,55
RECIPIENT 2	Masse (g)	4354
	Volume (cm ³)	955,55
RECIPIENT 3	Masse (g)	4354
	Volume (cm ³)	955,55
MOYENNE		1,254
3. GRAVIERS CONCASSES 8/15		
RECIPIENT 1	Masse (g)	4354
	Volume (cm ³)	955,55
RECIPIENT 2	Masse (g)	4354
	Volume (cm ³)	955,55
RECIPIENT 3	Masse (g)	4354
	Volume (cm ³)	955,55
MOYENNE		1,224

3. GRAVIERS CONCASSES 4/8		
RECIPIENT 1	Masse (g)	4354
	Volume (cm ³)	955,55
RECIPIENT 2	Masse (g)	4354
	Volume (cm ³)	955,55
RECIPIENT 3	Masse (g)	4354
	Volume (cm ³)	955,55
MOYENNE		1,317

Annexe C. MASSE VOLUMIQUE ABSOLUE DES GRANULATS

MASSE VOLUMIQUE ABSOLUE			
1. SABLE			
ESSAI 1	Masse sèche	200	ρ_1
	V1(ml)	290	
	V2(ml)	367	
ESSAI 2	Masse sèche	200	ρ_2
	V1(ml)	300	
	V2(ml)	377	
ESSAI 3	Masse sèche	200	ρ_3
	V1(ml)	310	
	V2(ml)	387	
MOYENNE		2,597	
2. GRAVIERS CONCASSES 4/8			
ESSAI 1	Masse sèche	300	ρ_1
	V1(ml)	250	
	V2(ml)	361,1	
ESSAI 2	Masse sèche	300	ρ_2
	V1(ml)	300	
	V2(ml)	409	
ESSAI 3	Masse sèche	300	ρ_3
	V1(ml)	350	
	V2(ml)	456,3	
MOYENNE		2,758	

3. GRAVIERS CONCASSES 8/15			
ESSAI 1	Masse sèche	300	ρ_1
	V1(ml)	260	
	V2(ml)	371	
ESSAI 2	Masse sèche	300	ρ_2
	V1(ml)	310	
	V2(ml)	419,7	
ESSAI 3	Masse sèche	300	ρ_3
	V1(ml)	340	
	V2(ml)	449,2	
MOYENNE		2,728	
2. GRAVIERS CONCASSES 15/25			
ESSAI 1	Masse sèche	300	ρ_1
	V1(ml)	250	
	V2(ml)	375	
ESSAI 2	Masse sèche	300	ρ_2
	V1(ml)	280	
	V2(ml)	403	
ESSAI 3	Masse sèche	300	ρ_3
	V1(ml)	310	
	V2(ml)	431	
MOYENNE		2,439	

Annexe D. COEFFICIENT D'UNIFORMITE ET DE COURBURE DES GRANULATS

COEFFICIENT D'UNIFORMITE				
1. GRAVIERS CONCASSES 15/25				
D60				23,088
D10				17,088
			CU	1,351
2. GRAVIERS CONCASSES 8/15				
D60				5,693
D10				3,614
			CU	1,575
3. GRAVIERS CONCASSES 4/8				
D60				11,68
D10				5,87
			CU	1,989
4. SABLE				
D60				0,764
D10				0,164
			CU	4,658

COEFFICIENT DE COURBURE				
1. GRAVIERS CONCASSES 15/25				
D60				23,088
D30				19,95
D10				17,088
			CZ	1,008
2.GRAVIERS CONCASSES 8/15				
D60				5,693
D30				4,518
D10				3,614
			CZ	0,992
3.GRAVIERS CONCASSES 4/8				
D60				11,68
D30				8,35
D10				5,87
			CZ	1,016
4. SABLE				
D60				0,764
D30				0,164
D10				0,314
			CZ	0,112

Annexe E. ESSAI D'EQUIVALENT DE SABLE

EQUIVALENT DE SABLE				
Prise d'essai: 120g				
Eprouvette numéro 01				
LECTURE A LA REGLE (cm)			H1	89
			H2	94
LECTURE AU PISTON (cm)			H1	92
			H2	94
Eprouvette numéro 02				
LECTURE A LA REGLE (cm)			H1	92
			H2	97
LECTURE AU PISTON (cm)			H1	93
			H2	97
Moyene lecture à la règle				94,763
Moyene lecture au piston				96,874
Moyenne des moyennes				95,815

Annexe F. ESSAI DE LOS ANGELES

LOS ANGELES	
1. GRAVIERS CONCASSES 15/25	
Prise d'essai en gramme	5000
Nombre des boules utilisées	11
Poids des particules inférieures à 1,6 (e)	592
Coefficient LA trouvé	11,84
1. GRAVIERS CONCASSES 8/15	
Prise d'essai en gramme	5000
Nombre des boules utilisées	9
Poids des particules inférieures à 1,6 (e)	796
Coefficient LA trouvé	15,92
1. GRAVIERS CONCASSES 4/8	
Prise d'essai en gramme	5000
Nombre des boules utilisées	7
Poids des particules inférieures à 1,6 (e)	902
Coefficient LA trouvé	18,04

Annexe G. TAUX D'ABSORPTION D'EAU

1. GRAVIERS CONCASSES 15/25	
Masse avant immersion (g)	1000
Masse après immersion (g)	1018
Taux d'absorption	1,8
Porosité	2,257
2.GRAVIERS CONCASSES 8/15	
Masse avant immersion (g)	1000
Masse après immersion (g)	1013
Taux d'absorption	1,3
Porosité	1,591
3.GRAVIERS CONCASSES 4/8	
Masse avant immersion (g)	500
Masse après immersion (g)	509
Taux d'absorption	1,8
Porosité	0

Annexe H. RESULTATS D'ESSAI DE COMPRESSION

FORMULATIONS BETONS				
Béton témoins à 3 jours				
Désignation	Masse (Kg)	Force appli	Résistance	Résistance Moyenne (Mpa)
Eprouvette 1	15,186	220,907	10,987	11,629
Eprouvette 2	15,029	242,816	12,077	
Eprouvette 3	14,767	237,709	11,823	
Béton témoins à 7 jours				
Eprouvette 1	14,773	253,102	13,012	13,933
Eprouvette 2	14,663	283,771	14,114	
Eprouvette 3	14,667	295,036	14,674	
Béton témoins à 28 jours				
Eprouvette 1	14,786	402,123	20,102	21,261
Eprouvette 2	14,736	432,321	21,502	
Eprouvette 3	14,775	445,948	22,18	
FORMULATION PAR SUBSTITUTIONS DU CIMENT				
Béton à 3 jours par substitutions ciment à 1 %				
Eprouvette 1	15,007	161,553	8,035	8,775
Eprouvette 2	15,113	196,644	9,78	
Eprouvette 3	14,958	171,141	8,512	
Béton à 7 jours par substitutions ciment à 1 %				
Eprouvette 1	14,907	192,09	9,554	10,527
Eprouvette 2	15,234	232,745	11,576	
Eprouvette 3	14,688	210,167	10,453	
Béton à 28 jours par substitutions ciment à 1 %				
Eprouvette 1	14,791	302,455	15,143	15,574
Eprouvette 2	15,166	328,258	16,326	
Eprouvette 3	14,971	306,683	15,253	

Béton à 3jours par substitutions ciment à 3 %				
Eprouvette 1	14,319	167,226	8,91	8,379
Eprouvette 2	14,517	158,733	7,837	
Eprouvette 3	14,651	163,141	8,391	
Béton à 7jours par substitutions ciment 3%				
Eprouvette 1	14,319	278,531	14,26	13,411
Eprouvette 2	14,517	243,101	12,543	
Eprouvette 3	14,651	273,398	13,43	
Béton à 28jours par substitutions ciment 3%				
Eprouvette 1	14,124	432,943	21,533	20,251
Eprouvette 2	14,46	380,811	18,94	
Eprouvette 3	14,786	407,746	20,28	
Béton à 3jours par substitutions ciment 5%				
Eprouvette 1	14,504	193,243	9,6115862	9,038
Eprouvette 2	14,677	172,527	8,5816552	
Eprouvette 3	14,786	179,347	8,9209655	
Béton à 7jours par substitutions ciment 5%				
Eprouvette 1	14,514	309,277	15,382781	14,465
Eprouvette 2	14,827	276,132	13,734437	
Eprouvette 3	14,666	287,049	14,277483	
Béton à 28jours par substitutions ciment 5%				
Eprouvette 1	14,514	467,033	23,228	21,842
Eprouvette 2	14,477	416,973	20,739	
Eprouvette 3	14,786	433,469	21,559	

Béton à 3jours par substitutions ciment 7%				
Eprouvette 1	14,534	158,015	7,0348966	7,838
Eprouvette 2	14,767	151,563	7,5384828	
Eprouvette 3	14,046	179,745	8,9408276	
Béton à 7jours par substitutions ciment 7%				
Eprouvette 1	14,364	252,906	11,25894	12,544
Eprouvette 2	14,927	242,585	12,064901	
Eprouvette 3	14,336	287,693	14,309272	
Béton à 28jours par substitutions ciment 7%				
Eprouvette 1	14,319	381,92	17,001	18,942
Eprouvette 2	14,425	366,301	18,218	
Eprouvette 3	14,006	434,425	21,607	
Béton à 3jours par substitutions ciment 9%				
Eprouvette 1	14,091	179,745	8,9408276	8,545
Eprouvette 2	14,402	187,472	9,324	
Eprouvette 3	14,586	148,199	7,3714785	
Béton à 7jours par substitutions ciment 9%				
Eprouvette 1	14,721	287,693	14,309272	14,403
Eprouvette 2	14,211	300,017	14,922517	
Eprouvette 3	14,552	281,046	13,978146	
Béton à 28jours par substitutions ciment 9%				
Eprouvette 1	14,601	434,425	21,607	21,749
Eprouvette 2	14,281	453,042	22,533	
Eprouvette 3	14,096	424,384	21,107	

Annexe I. EVALUATION DU COUTS DES BETONS

COUT DU BETON					
Formulation Béton témoin					
Désignation	Quantité	Unité	Prix unitaire	Prix total	
Ciment	400,000000	kg	\$12,50	\$100,00	\$129,97
Sable	0,530000	m3	\$25,00	\$13,25	
Graviers 4/8	0,042000	m3	\$33,00	\$1,39	
Graviers 8/15	0,146000	m3	\$33,00	\$4,82	
Graviers15/25	0,293000	m3	\$33,00	\$9,67	
Eau	210,526316	litre	\$0,00	\$0,84	
Formulation par substitutions 1%					
Désignation	Quantité	Unité	Prix unitaire	Prix total	
Ciment	396,000000	kg	\$12,50	\$99,00	\$131,44
Sable	0,530000	m3	\$25,00	\$13,25	
Graviers 4/8	0,042000	m3	\$33,00	\$1,39	
Graviers 8/15	0,146000	m3	\$33,00	\$4,82	
Graviers15/25	0,293000	m3	\$33,00	\$9,67	
Biochar	4,000000	kg	\$0,62	\$2,48	
Eau	208,421050	litre	\$0,00	\$0,83	
Formulation par substitutions 3%					
Désignation	Quantité	Unité	Prix unitaire	Prix total	
Ciment	388,000000	kg	\$12,50	\$97,00	\$134,38
Sable	0,530000	m3	\$25,00	\$13,25	
Graviers 4/8	0,042000	m3	\$33,00	\$1,39	
Graviers 8/15	0,146000	m3	\$33,00	\$4,82	
Graviers15/25	0,293000	m3	\$33,00	\$9,67	
Biocharbon	12	kg	\$0,62	\$7,44	
Eau	204,210530	litre	\$0,00	\$0,82	

Formulation par substitutions 5%				
Désignation	Quantité	Unité	Prix unitaire	Prix total
Ciment	380,000000	kg	\$12,50	\$95,00
Sable	0,530000	m3	\$25,00	\$13,25
Graviers 4/8	0,042000	m3	\$33,00	\$1,39
Graviers 8/15	0,146000	m3	\$33,00	\$4,82
Graviers 15/25	0,293000	m3	\$33,00	\$9,67
Biocharbon	20,000000	kg	\$0,62	\$12,40
Eau	200,000000	litre	\$0,00	\$0,80
Formulation par substitutions 7%				
Désignation	Quantité	Unité	Prix unitaire	Prix total
Ciment	372,000000	kg	\$12,50	\$93,00
Sable	0,530000	m3	\$25,00	\$13,25
Graviers 4/8	0,042000	m3	\$33,00	\$1,39
Graviers 8/15	0,146000	m3	\$33,00	\$4,82
Graviers 15/25	0,293000	m3	\$33,00	\$9,67
Biocharbon	28,000000	kg	\$0,62	\$17,36
Eau	195,789470	litre	\$0,00	\$0,78
Formulation par substitutions 9%				
Désignation	Quantité	Unité	Prix unitaire	Prix total
Ciment	364,000000	kg	\$12,50	\$91,00
Sable	0,530000	m3	\$25,00	\$13,25
Graviers 4/8	0,042000	m3	\$33,00	\$1,39
Graviers 8/15	0,146000	m3	\$33,00	\$4,82
Graviers 15/25	0,293000	m3	\$33,00	\$9,67
Biocharbon	36,000000	kg	\$0,62	\$22,32
Eau	191,578000	litre	\$0,00	\$0,77
COUT TOTAL MOY				\$136,10