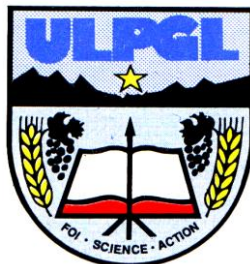


UNIVERSITE LIBRE DES PAYS DES GRANDS LACS
FACULTE DE SCIENCES ET TECHNOLOGIES

DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL



BP. 368 GOMA

www.ulpgl.net

OPTIMISATION DES CARACTERISTIQUES
MECANIQUES D'UN BETON LEGER DES
COPEAUX DE BOIS

Par **NZIZA ZAWADI JOHANNA**

Travail présenté et défendu en vue de l'obtention du
Diplôme de Bachelor en Sciences et Technologies

Option : Génie Civil

Directeur : C.T Ir. MASIKA MUHIWA GRACE

Encadreur : Ir. KOKO KATUMBI PASCAL

ANNEE ACADEMIQUE 2024 - 2025

Epigraphe

« Dans la vie, rien n'est à craindre, tout est à comprendre. »

Marie Curie

Dédicace

À ma famille,

Pour votre amour inconditionnel que vous m'avez toujours témoigné, pour votre soutien indéfectible et vos encouragements constants tout au long de mon parcours. Ce mémoire est l'aboutissement de vos sacrifices, de votre confiance et de votre présence à mes côtés

NZIZA ZAWADI JOHANNA

Remerciements

Avant toute chose, je rends grâce à Dieu, source de sagesse, de force et d'inspiration, pour m'avoir accompagnée tout au long de ce parcours académique et pour m'avoir accordé la persévérance nécessaire à l'aboutissement de ce travail.

J'adresse mes sincères remerciements à tout le corps professoral de la Faculté des Sciences et Technologies pour la qualité des enseignements dispensés, leur disponibilité et leur engagement constant dans la transmission du savoir. Leur encadrement a largement contribué à ma formation et à la réalisation de ce mémoire.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude au Doyen de la Faculté des Sciences et Technologies, Prof. Dr. Ing. Baraka Mushage Olivier, pour les efforts déployés en faveur d'un encadrement académique de qualité.

Mes remerciements les plus respectueux s'adressent à mon directeur de mémoire, CT. Masika Muhiwa, pour sa rigueur scientifique, ses orientations pertinentes, sa patience et son accompagnement soutenu tout au long de cette recherche. J'exprime également ma reconnaissance à mon encadreur Ir. Koko Katumbi, pour sa disponibilité, ses conseils avisés et ses encouragements constants, qui ont été déterminants dans la réalisation de ce travail.

À ma famille, je témoigne ma profonde reconnaissance pour votre amour inconditionnel, vos sacrifices et votre soutien indéfectible, qui ont constitué ma principale source de motivation.

À mes chers camarades, qui m'ont accompagnée depuis le début de cette année académique, merci pour votre solidarité, votre esprit d'entraide et les échanges enrichissants qui ont rendu ce parcours plus agréable et stimulant.

Enfin, à toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à la réussite de ce travail par leurs encouragements, leur soutien moral et leur affection, qu'elles trouvent ici l'expression de ma sincère gratitude.

NZIZA ZAWADI JOHANNA

Résumé

Dans un contexte marqué par la nécessité de promouvoir des matériaux de construction durables et de réduire l'exploitation excessive des ressources naturelles, ce travail s'intéresse à l'optimisation des caractéristiques mécaniques d'un béton léger par l'incorporation de copeaux de bois issus de déchets de rabotage du bois.

L'objectif est de produire un béton allégé présentant des performances mécaniques satisfaisantes par substitution partielle des granulats, tout en améliorant la compatibilité bois-ciment.

La formulation du béton a été réalisée selon la méthode de Dreux-Gorisse pour atteindre une résistance de référence de 20 MPa. Des copeaux de bois ont été introduits à des taux de 0%, 2%, 5%, 8%, 11% et 14 %. Ce choix de variation permet d'analyser l'influence progressive des copeaux de bois sur les propriétés mécaniques du béton. Par ailleurs, ces copeaux ont été traités par enrobage cimentaire afin de réduire leur forte absorption d'eau, passant de 98 % à 37 %, et améliorer leur adhérence à la matrice cimentaire, ce qui favorise une meilleure cohésion du matériau.

Les essais sur le béton frais révèlent une diminution de l'ouvrabilité avec l'ajout de copeaux, nécessitant un ajout d'eau limité pour éviter la ségrégation. La masse volumique du béton durci diminue progressivement avec le taux de substitution jusqu'à 1525 kg/m³ à 14 % de substitution, confirmant le caractère léger du matériau.

La résistance à la compression est fortement influencée par le traitement des copeaux. Les copeaux non traités réduisent significativement les performances : 20,20 MPa pour 2% à 7,63 MPa pour 14 %, tandis que les copeaux traités maintiennent ou améliorent la résistance : 20,51 MPa pour 2 % à 20,17 MPa pour 5 %. Le dosage optimal se situe entre 2 % et 5 %, offrant un compromis efficace entre légèreté et résistance.

Ces résultats confirment le potentiel de valorisation des déchets de bois pour la production de bétons légers performants et écologiques.

Mots clés : Optimisation, béton, caractéristiques mécaniques, copeaux de bois

Abstract

In a context marked by the need to promote sustainable building materials and reduce the overexploitation of natural resources, this study focuses on optimizing the mechanical properties of lightweight concrete through the incorporation of wood chips derived from planing waste.

The main objective is to produce lightweight concrete with satisfactory mechanical performance by partially substituting conventional aggregates, while improving wood–cement compatibility. The concrete mix was designed using the Dreux-Gorisse method to achieve a target compressive strength of 20 MPa. Wood chips were incorporated at substitution rates of 0%, 2%, 5%, 8%, 11%, and 14%, enabling an analysis of their progressive influence on the mechanical properties of the concrete.

To enhance performance, the wood chips were treated with a cementitious coating, reducing their water absorption capacity from 98% to 37% and improving their adhesion to the cement matrix, thereby promoting better cohesion within the material.

Tests on fresh concrete revealed a decrease in workability with increasing wood chip content, requiring careful and limited water adjustment to avoid segregation. The density of hardened concrete decreased progressively with higher substitution rates, reaching 1525 kg/m³ at 14%, thus confirming the lightweight nature of the material.

Compressive strength was significantly affected by the treatment of the wood chips. Untreated chips led to a notable reduction in strength, decreasing from 20.20 MPa at 2% substitution to 7.63 MPa at 14%. In contrast, treated wood chips maintained or even improved compressive strength, with values ranging from 20.51 MPa at 2% to 20.17 MPa at 5%. The optimal substitution rate lies between 2% and 5%, providing a balanced compromise between reduced density and mechanical performance.

These findings highlight the strong potential of wood waste as a sustainable resource for producing high-performance, eco-friendly lightweight concrete.

Keywords: Optimization, lightweight concrete, mechanical properties, wood chips, sustainability

Table des matières

Epigraphe	i
Dédicace.....	ii
Remerciements.....	iii
Résumé.....	iv
Table des matières	v
Liste des abréviations.....	ix
Liste des tableaux.....	x
Liste des figures	xii
Introduction générale	1
Chapitre 1 Généralités	5
1.1 Introduction	5
1.2 Généralité sur le matériau béton.....	5
1.2.1 Généralités	5
1.2.2 Définition	6
1.2.3 Composition du béton	6
1.2.4 Propriétés du béton	13
1.2.5 Classification du béton.....	16
1.2.6 Méthode de formulation du béton.....	17
1.3 Notion sur le béton léger	21
1.3.1 Généralité [21]	21
1.3.2 Types de béton légers [23]	22
1.3.3 Béton Léger à base de copeaux de bois	23
1.4 Conclusion partielle.....	25

Chapitre 2 Matériels et Méthodologie de travail	26
2.1 Introduction	26
2.2 Natures et Origine des matériaux	26
2.2.1 Copeaux de bois	26
2.2.2 Ciment	27
2.2.3 Eau de gâchage	27
2.2.4 Granulats	27
2.3. Caractérisation des matériaux	29
2.3.1. Analyse granulométrique [28]	29
2.3.2. Le degré de propreté du sable [28]	31
2.3.3. Masse volumique apparente des granulats [28]	34
2.3.4. Masse volumique absolue des granulats [28]	35
2.3.5. Taux d'absorption d'eau des granulats	37
2.3.6. Essai de Los Angeles [28]	38
2.4. Essais sur les liants hydrauliques (Ciment)	40
2.4.1. Essai de consistance [28]	40
2.5. Traitement des copeaux de bois par enrobage cimentaire	42
2.6. Formulation du béton :méthode de Dreux Gorisse	43
2.6.1. Objectif de la méthode	43
2.6.2. Critère de résistance	43
2.6.3. Choix du ciment	43
2.6.4. Formulation de Dreux-Gorisse [20]	44
2.6.5. Détermination du rapport C/E	44
2.6.6. Corrections sur le dosage en ciment C et le dosage en eau E	46
2.6.7. Détermination du mélange optimal à minimum de vides	47
2.6.8. Détermination des pourcentages en volumes absolus de matériaux	48
2.6.9. Détermination de la compacité du béton	49
2.6.10. Détermination des masses de granulats	51
2.6.11. Obtention de la formulation théorique de béton	51

**OPTIMISATION DES CARACTERISTIQUES MECANIQUES D'UN BETON LEGER DES
COPEAUX DE BOIS**

2.7.	Caractérisation du béton.....	52
2.7.1.	La consistance	52
2.7.2.	Densité du béton frais	54
2.7.3.	Résistance à la compression.....	55
2.8.	Conclusion partielle.....	55
Chapitre 3 Présentation et interprétation des résultats.....		57
3.1.	Introduction	57
3.2.	Caractéristiques des constituants.....	57
3.2.1.	Graviers.....	57
3.2.2.	Ciment.....	61
3.3.	Résultat de la formulation	61
3.3.1.	Données de base.....	62
3.3.2.	Dosage en liant et en eau	63
3.3.3.	Dosage en granulat.....	63
3.4.	Caractérisation du béton.....	65
3.4.1.	Consistance du béton	65
3.4.2.	Masse volumique du béton à l'état durci	66
3.4.3.	Résistance à la compression.....	67
3.5.	Conclusion partielle.....	69
Conclusion générale.....		70
BIBLIOGRAPHIE.....		71
ANNEXE		a

Liste des abréviations

BO	: Béton Ordinaire
BC	: Béton contenant des Copeaux
BCN	: Béton avec Copeaux Non-traités
BCT	: Béton avec Copeaux Traités
C	: Dosage en ciment
CO ₂	: Dioxyde de carbone
CPA	: Ciment Portland Artificiel
CPJ	: Ciment Portland Composé
CPZ	: Ciment Pouzzolanique
M _f	: Module de finesse
D _{max}	: Dimension maximale des granulats
E/C	: Rapport Eau Ciment
F _{ck}	: Résistance caractéristique à la compression du béton
LA	: Los Angeles
NF EN	: Norme Française- Norme Européenne
ULPGL	: Université Libre des Pays des Grands Lacs

Liste des tableaux

Tableau 1.1 :Classes de résistance à la compression des ciments courants [4]	8
Tableau 1.2:Differents types de ciments courants normalisés [15]	9
Tableau 1.3 : différents classes granulaires et caractéristiques dimensionnelles [18]	10
Tableau 1.4 : Ouvrabilité du béton suivant l'affaissement [20].....	14
Tableau 1.5 : Classification des types de béton [20].....	15
Tableau 2.1: Les valeurs de l'équivalent de sable [28].....	34
Tableau 2.2 : Classification des granulats suivant les masses volumiques [30]	36
Tableau 2.3 :Qualité des granulats	40
Tableau 2.4 : Coefficient granulaire G' en fonction de la qualité et la dimension maximale des granulats D_{max} [20].....	45
Tableau 2.5 :correction sur le dosage en eau en fonction de D_{max} [20]	46
Tableau 2.6 :K en fonction de la forme des granulats, du mode de vibration et du dosage en ciment	48
Tableau 2.7 :Compacité du béton en fonction de D_{max}, de la consistance et du serrage [32]	50
Tableau 2.8 :Classe de consistance des bétons [34]	53
Tableau 2.9 : Classification des bétons selon les densités.....	55
Tableau 3.1 : Caractéristiques physiques des granulats	59
Tableau 3.2 :Taux d'absorption des copeaux de bois non traités.....	60
Tableau 3.3 :Résultat du taux d'absorption des copeaux de bois traités.....	60
Tableau 3.4 :Valeurs de coefficient du Los Angeles	61
Tableau 3.5 :Caractéristique du ciment utilisé	61
Tableau 3.6 :Type et nombre d'éprouvettes confectionnés	62
Tableau 3.7 :Données de base du béton d'étude.....	62
Tableau 3.8 :Dosage en eau et en ciment	63
Tableau 3.9 : Dosage massique des granulats pour $1m^3$ de béton.....	64
Tableau 3.10 : Dosage des graviers par substitution pour $1m^3$.....	65

Tableau 3.11 : Affaissement des différents bétons 66

Tableau 3.12 : Masse volumique du béton durci Erreur ! Signet non défini.

Liste des figures

<i>Figure 1.1 : types des bétons légers [23]</i>	22
<i>Figure 2.1 : Les copeaux de bois mouillés</i>	27
<i>Figure 2.2: Concassé 4/8</i>	28
<i>Figure 2.3 :Sable roulé</i>	28
<i>Figure 2.4: Concassé 15 /25</i>	28
<i>Figure 2.5: Concassé 8/15</i>	28
<i>Figure 2.6 :Tamiseuse électrique</i>	30
<i>Figure 2.7 : Balance de précision</i>	30
<i>Figure 2.8 : Agitateur ,piston ; éprouvettes</i>	33
<i>Figure 2.9 :Appareil de Los Angels</i>	39
<i>Figure 2.10 : Appareil de Vicat avec Sonde</i>	42
<i>Figure 2.11 :Abaque permettant d'évaluer approximativement le dosage en ciment</i>	46
<i>Figure 2.12 :Détermination des pourcentages en volumes absolus des granulats</i>	49
<i>Figure 2.13 : Cône d'Abraham</i>	53
<i>Figure 3.1 : Courbe granulométrique des granulats</i>	58
<i>Figure 3.2 : Courbe de référence granulométrique</i>	64
<i>Figure 3.3 :Résistance du béton à 7 et 28 jours</i>	68

Introduction générale

Chaque seconde, près de 190 m³ de béton sont coulés à travers le monde, soit environ 6 milliards de m³ par an [1]. Ces chiffres témoignent de l'importance de ce matériau devenu fondamental dans le secteur de la construction. Le béton est largement utilisé pour la réalisation d'infrastructures, allant des routes et bâtiments aux ouvrages hydrauliques. Ce matériau est particulièrement apprécié pour sa résistance à la compression, sa durabilité, sa malléabilité à l'état frais et sa capacité à prendre diverses formes après durcissement [2]. Sa qualité et ses performances dépendent largement de sa composition, notamment du choix des granulats, qui représentent environ 80% de sa masse et jouent un rôle déterminant dans ses propriétés mécaniques, en particulier la compression [3].

Cependant, la fabrication du béton conventionnel repose essentiellement sur l'exploitation de ressources naturelles non renouvelables, dont l'extraction intensive entraîne des impacts écologiques et économiques, notamment l'épuisement des ressources, la dégradation des sols et de la végétation, la pollution des eaux.

Par ailleurs, le béton conventionnel présente certaines limites d'ordre techniques, notamment une masse volumique élevée, surcharges des structures et limitations de construction sur sols de faible capacité portante [4]. Face à ces contraintes, la recherche des matériaux de construction à la fois légers, durables et respectueux de l'environnement s'impose comme une nécessité, notamment dans le contexte actuel de lutte contre le changement climatique et conforme aux réglementations environnementales.

Dans cette perspective, le développement des bétons allégés suscite un intérêt croissant. Ces matériaux visent à réduire la masse volumique du béton entre 800 et 2 000 Kg/m³, tout en conservant des propriétés mécaniques acceptables. Leur formulation repose généralement sur l'utilisation de granulats légers naturels ou artificiels (polystyrène expansé, argile expansée, matériaux volcanique poreux, granulats d'origines végétales, etc.) [5]. Parmi ces alternatives, les granulats végétaux présentent un double avantage : ils constituent une ressource

renouvelable et permettent de valoriser des déchets disponibles en abondance, contribuant ainsi à une économie circulaire et à la réduction de la masse volumique [6].

C'est dans ce cadre que s'inscrit la présente recherche, qui porte sur la valorisation de déchets issus des scieries, en particulier les copeaux de bois. L'objectif est d'examiner leur potentiel en substitution partielle des granulats conventionnels pour concevoir un béton léger alliant résistance mécaniques et faible impact environnemental.

Cependant, bien que les déchets végétaux, tels que les copeaux de bois, soient abondants et présentent l'avantage d'alléger la structure du béton, leur utilisation pose un problème majeur qui est la diminution des caractéristiques mécaniques du béton. Plusieurs études antérieures, ont montré que des substitutions de granulats par les copeaux de bois a des conséquences importantes sur le comportement mécanique du béton [7, 8, 9]. Cette perte de performance s'explique par la composition organique du bois, qui rend le bois incompatible à la matrice cimentaire et perturbe l'hydratation et la prise cimentaire ; la dégradation des composant du bois du à l'environnement alcalin, la porosité et hygroscopicité influençant la fissuration du matériau par le phénomène de gonflement-retrait des fibres de bois, et leur surface lisse, limitant l'adhérence des fibres avec la matrice cimentaire [10, 11, 12]

Ainsi, la problématique centrale de ce travail réside dans la possibilité d'intégrer efficacement des copeaux de bois comme granulats légers tout en maintenant des caractéristiques mécaniques acceptables. L'enjeu est de concevoir un béton léger et capable de répondre aux exigences structurelles et environnementales actuel

Afin de mieux comprendre les contraintes liées à l'incorporation des copeaux de bois dans le béton et de proposer des solutions adaptées, la présente recherche s'organise autour de la question principale suivante : comment utiliser efficacement les copeaux de bois comme granulats légers sans compromettre les performances mécaniques du béton ? De cette question principale, découle les questions spécifiques suivantes: quel serait l'impact de substitutions par les copeaux de bois traités et non traités sur la résistance et la masse volumique du béton

?Quels seraient le taux le plus optimal pour maximiser l'efficacité du béton léger avec copeaux de bois ?

Pour répondre à ces interrogations, trois hypothèses sont avancées. Premièrement, l'incorporation des copeaux de bois en tant que granulats légers, dans des proportions adaptées, pourrait permettre de réduire la masse volumique du béton tout en maintenant des performances mécaniques satisfaisantes. Deuxièmement, seuls les copeaux traités permettraient de limiter la perte de résistance à la compression. Enfin, on estime qu'il pourrait exister un taux d'incorporation optimal pouvant concilier légèreté et performances mécaniques.

Le choix de ce sujet se justifie par plusieurs raisons. Sur le plan environnemental, il s'inscrit dans une démarche de valorisation des déchets végétaux, contribuant à la réduction de la pollution et à la préservation des ressources naturelles non renouvelables. Sur le plan technique, il répond au besoin croissant de développer des bétons légers adaptés aux contraintes des sols médiocres et aux ouvrages nécessitant une réduction de charges. Enfin, sur le plan scientifique, il vise à combler les limites observées dans les études antérieures en explorant de nouvelles techniques d'amélioration, notamment le traitement des copeaux. Le présent travail a pour objectif principal d'optimiser les caractéristiques mécaniques d'un béton intégrant les copeaux de bois, afin de concilier légèreté et résistance.

Pour atteindre l'objectif général, il sera nécessaire de confectionner dans un premier temps un béton de référence afin de disposer d'un matériau témoin pour les comparaisons. Dans un second temps, un béton intégrant des copeaux de bois sans traitement sera élaboré afin d'évaluer l'effet de leur incorporation sur les propriétés mécaniques et physiques du matériau. Enfin, de traitements seront appliqués dans le but d'améliorer leur adhérence à la matrice cimentaire et de réduire leur absorption d'eau, suivies de la réalisation d'essais mécaniques permettant d'identifier les formulations offrant les meilleures performances

La méthodologie adoptée repose sur une approche documentaire, visant à sélectionner les ouvrages existant relatifs aux différentes formulations du béton et béton léger, ainsi que sur une approche expérimentale consistant à réaliser et à tester les différentes éprouvettes en

laboratoire. Les données obtenues feront l'objet d'une analyse statistique afin d'en assurer une interprétation rigoureuse. Cette étude se limite à l'évaluation caractéristiques mécaniques du béton à base de copeaux de bois et en particulier la résistance à la compression.

Hormis l'introduction et la conclusion ce travail est subdivisé en trois chapitres. Le Chapitre premier qui présente les généralités sur le béton en général et le béton léger en particulier ainsi que leurs caractéristiques. Le Chapitre deuxième qui présente la méthodologie à suivre pendant les essais de laboratoire. Enfin, le Chapitre troisième qui présente les résultats des essais effectués au laboratoire et interprétation des données numériques et graphiques des résultats.

Chapitre 1

Généralités

1.1 Introduction

Ce chapitre présente les généralités sur les matériaux entrant dans la composition du béton, matériau fondamental dans le secteur de la construction.

Il sera question de présenter les différents constituants du béton, notamment le ciment, les granulats, l'eau et les adjuvants, en analysant leurs caractéristiques ainsi que leur rôle dans le comportement global du matériau.

1.2 Généralité sur le matériau béton

Le béton est un matériau composite utilisé en génie civil, obtenu par le mélange de ciment, de granulats et d'eau. Ses performances dépendent de la qualité de ses constituants, du dosage adopté et des conditions de mise en œuvre. La compréhension de ses propriétés générales est essentielle pour maîtriser sa formulation et son comportement.

1.2.1 Généralités

Le béton est né du besoin d'avoir un matériau de construction économique, malléable au moment de le mettre en place, et résistant [13]. Ce matériau est devenu très important et presque irremplaçable dans la réalisation des constructions pour des raisons économiques et techniques. Ces caractéristiques dépendent fortement de ses composantes mais également des opérations de mise en œuvre.

Ce chapitre présente les principaux constituants du béton ainsi que leurs influences sur ses performances, en particulier sur la résistance à la compression, paramètre central dans l'évaluation de la qualité du béton.

Cette approche est d'autant plus pertinente dans le contexte du béton léger à base de copeaux de bois, qui introduit des variations significatives dans la composition classique du béton, et donc dans ses propriétés mécaniques.

Il est donc essentiel de comprendre les fondamentaux du matériau béton avant d'aborder les spécificités liées à l'incorporation de matériaux ligno-cellulosiques.

1.2.2 Définition

Le béton est un matériau de construction composite occupant une place essentielle dans le domaine du génie civil. Il est apprécié pour sa capacité à être mis en forme à l'état frais et pour ses performances mécaniques et sa durabilité à l'état durci. Son utilisation généralisée s'explique par la disponibilité de ses constituants, son coût relativement faible et son adaptabilité à une grande variété d'ouvrages.

De manière générale, le béton est obtenu par le mélange d'un liant hydraulique, le ciment, de granulats, de l'eau et éventuellement d'adjuvants ou d'additions. Les propriétés du béton dépendent fortement de la nature de ces constituants ainsi que de leurs proportions respectives [14].

1.2.3 Composition du béton

Le béton est un mariage de liants hydrauliques, granulats /agrégats et de l'eau. C'est un matériau multiphasique, constitué d'un mélange de plusieurs composants très différents, présentant des caractéristiques qui sont fonction de celles de ses composants et de leur proportion dans le mélange.

Le béton est composé : du ciment, d'eau, des granulats et, le plus souvent, adjuvants, additions ou fibres qui constituent un ensemble homogène

1.2.3.1 ciment [15, 16]

Le ciment est un matériau essentiel dans le domaine de la construction et du bâtiment depuis des millénaires. Inventé en 1824 par L'écossais Aspdin, le ciment Portland, nommé ainsi à cause de son aspect durci qui rappelait celui de la pierre calcaire de la Presqu'île de Portland, est un liant hydraulique fabriqué à partir d'un mélange de chaux et d'argile [17].

Il est fait essentiellement à partir de quatre constituants: la chaux(CaO), la silicate(SiO_2), l'alumine(Al_2O_3) et l'oxyde de fer(Fe_2O_3). Ces quatre éléments de base ne se trouvent pas dans la nature dans des états adéquats favorisant l'émergence des liants.

La classe de résistance du ciment influence directement les résistances mécaniques du béton, notamment la résistance à la compression, paramètre essentiel pour la conception des ouvrages.

1.2.3.1.1 Classe de résistance courante

La résistance courante d'un ciment est la résistance à la compression déterminée conformément à la norme EN 196-1, après 28 jours.

Trois classes de résistances courante sont couvertes : classe 32,5 ; classe 42,5 ; classe 52,5.

A chaque classe de résistance courante, correspondent deux classes de résistances : une classe de résistance à court terme ordinaire, notée N, et une classe de résistance à court terme élevée, notée R.

Les performances mécaniques du béton dépendent en grande partie de la classe de résistance du ciment utilisé. La résistance à la compression du ciment, évaluée à différents âges, ainsi que le temps de début de prise et la stabilité volumique constituent des paramètres essentiels pour le choix du ciment en fonction des exigences de l'ouvrage.

Le tableau 1.1 présente les principales classes de résistance à la compression des ciments courants, conformément aux critères normalisés.

Tableau 1.1 :Classes de résistance à la compression des ciments courants [4]

Classe de résistance	Résistance à la compression Mpa			
	Résistance à court terme		Résistance courante	
	2 Jours	7 Jours	28 Jours	
32,5 N	-	$\geq 16,0$	$\geq 32,5$	$\geq 52,5$
32,5 R	$\geq 10,0$	-	$\geq 32,5$	$\geq 52,5$
42,5 N	$\geq 10,0$	-	$\geq 42,5$	$\geq 62,5$
42,5 R	$\geq 20,0$	-	$\geq 42,5$	$\geq 62,5$
52,5 N	$\geq 20,0$	-	$\geq 52,5$	-
52,5 R	$\geq 30,0$	-	$\geq 52,5$	-

1.2.3.1.2 Différents types de ciments

Les ciments utilisés dans le domaine de la construction se distinguent par leur composition et leur teneur en clinker, lesquelles influencent leurs propriétés mécaniques et leur comportement à long terme. La classification normalisée des ciments permet d'orienter leur choix en fonction des performances recherchées et des conditions d'utilisation.

Le tableau 1.2 présente les principaux types de ciments courants normalisés, ainsi que leurs teneurs en clinker et en constituants secondaires.

Tableau 1.2: Différents types de ciments courants normalisés [15]

Désignation	Types de ciments	Teneur en clinker	Teneur des constituants secondaires
CPA-CEM I	Ciment portland	95 à 100 %	0 à 5 %
CPJ-CEM II/A	Ciment portland composé	80 à 94 %	0 à 5 %
CPJ-CEM II/B	Ciment portland composé	65 à 79 %	0 à 5 %
CHF-CEM III/A	Ciment de haut Fourneau	35 à 64 %	0 à 5 %
CHF-CEM III/B	Ciment de haut Fourneau	20 à 34 %	0 à 5 %

1.2.3.2 Granulats [16,18]

Le granulat est les matériaux inertes, sables graviers ou cailloux, qui aggloméré par un liant, constituent le squelette du béton. C'est l'ensemble des grain compris entre 0 et 125 mm dont l'origine peut être naturelle ou artificielle, ou provenant de recyclage.

Les granulats sont utilisés pour la réalisation d'ouvrages de Génie Civil, de travaux routiers et de bâtiments. Les granulats constituent la majeure partie du volume du béton et sont donc essentiels pour la réalisation de tous types de bâtiments et d'infrastructures. Mélangés au ciment et à l'eau, ils forment un matériau composite aux propriétés remarquables.

1.2.3.2.1 Classes granulaires

Les granulats sont classés en fonction de leur granularité (distribution dimensionnelle des grains) déterminée par analyse granulométrique à l'aide de tamis. Un granulat est désigné par sa classe granulaire exprimée par le couple d/D ou 0/D avec :

d : dimension inférieure du granulat ;

D : dimension supérieure du granulat

Cette classification permet de distinguer les différentes familles de granulats, depuis les éléments les plus fins jusqu'aux éléments les plus grossiers, et joue un rôle déterminant dans la compacité, l'ouvrabilité et les performances mécaniques du béton. Le tableau 1.1 :3 présente les principales classes granulaires ainsi que leurs caractéristiques dimensionnelles.

Tableau 1.3 : différents classes granulaires et caractéristiques dimensionnelles [18]

Familles	Dimensions	Caractéristiques
Fillers	0/D	D<2 mm avec au moins 85 % de passant à 1,25mm et 70 % de passant à 0,063 mm
Sablons	0/D	$D \leq 1$ mm avec moins de 10 % de passant à 0,063 mm
Sables	0/D	$0 \text{ mm} < D \leq 4 \text{ mm}$
Graves	0/D	$D < 6.3 \text{ mm}$
Gravillons	d/D	$d \geq 2 \text{ mm}$ et $D \leq 63 \text{ mm}$
Ballasts	d/D	$d \geq 31,5 \text{ mm}$ et $D = 50$ ou 63 mm

Il est possible de réaliser des mélanges de granulats pour obtenir des distributions granulaires adaptées à chaque utilisation.

1.2.3.2.2 Caractéristiques des granulats

Les granulats doivent répondre à des exigences et des critères de qualité et de régularité qui dépendent, d'une part, de la nature de la roche (résistance aux chocs et à l'usure, caractéristiques physico-chimiques,) et, d'autre part, de caractéristiques physiques liées au processus d'élaboration des granulats (masse volumique, porosité, absorption d'eau, forme et propreté,).

La nature minérale des granulats est un critère fondamental pour son emploi, chaque roche possédant des caractéristiques intrinsèques spécifiques en termes de résistance mécanique et de tenue au gel, ainsi que des propriétés physico-chimiques et des propriétés chimiques.

1.2.3.2.3 Types des granulats

a) Granulats courants

Les granulats sont considérés comme courant lorsque leur masse volumique est supérieure à 2 t/m^3 . Pour la composition des bétons on utilise en général des matériaux naturels alluvionnaires : sables, graviers. Cependant, lorsque les matériaux font défaut localement, il est possible d'utiliser des roches érotiques ou sédimentaires transformées en granulométrie par concassage.

b) Granulats lourds

Ils sont essentiellement employés pour la confection des bétons lourds utilisés pour la construction d'ouvrages nécessitant une protection biologique contre les rayonnements produits, par exemple, dans les accélérateurs et piles atomiques.

c) Granulats légers

Ils sont essentiellement employés pour la confection des bétons légers. Ces bétons présentent en général des résistances d'autant plus faibles qu'ils sont plus légers. D'une masse volumique variable entre 400 et 800 kg/m³, ils permettent de formuler des bétons présentant une bonne isolation thermique et une faible masse volumique comprise entre 1200 et 2000 kg/m³.

L'absorption d'eau, importante et variable, des granulats légers a toujours été considérée comme une grosse difficulté sur les chantiers car elle entraîne d'importantes variations de plasticité et d'ouvrabilité des bétons.

Les granulats légers usuels sont la ponce (lave volcanique de couleur gris clair rendue très légère par les nombreuses bulles de gaz emprisonnées lors du refroidissement), la pouzzolane (roche d'origine volcanique à structure alvéolaire de couleur brun-noir à rouge brique), l'argile ou le schiste expansés et le laitier expansé.

On utilise aussi des composants légers qui sont d'origine aussi bien végétale et organique que minérale (bois, polystyrène expansé, liège, vermiculite). Ils sont particulièrement adaptés pour les bétons d'isolation, mais également pour la réalisation d'éléments légers : blocs coffrant, blocs de remplissage, dalles, ou rechargements sur planchers peu résistants.

1.2.3.3 Eau de gâchage [16,19]

L'eau de gâchage joue un rôle fondamental dans l'hydratation du ciment et la mise en œuvre du béton. Sa qualité est un facteur déterminant pour les performances mécaniques et la durabilité du béton. Une eau impropre peut entraîner des défauts tels que la diminution des résistances ou des pathologies du béton.

Selon la norme EN 1008, l'eau utilisée doit être propre, exemptée de matières organiques, d'acides, d'huiles, de sels et de tout élément pouvant perturber la réaction d'hydratation.

Une eau contaminée ou trop chargée en impuretés peut entraîner une réduction de la résistance, un durcissement anormal (trop rapide ou trop lent), ainsi que des problèmes de fissuration et de durabilité à long terme.

Ainsi, l'utilisation d'une eau conforme aux exigences normatives et sans impuretés est indispensable pour obtenir un béton de bonne qualité, durable et adapté aux exigences structurelles

1.2.3.4 Adjuvants

Les adjuvants sont des produits chimiques qui sont incorporés dans les bétons lors de leur malaxage ou avant leur mise en œuvre à des dosages inférieurs à 5% du poids de ciment. Ces adjuvants sont utilisés, entre autres, pour accélérer ou retarder la prise du ciment, pour réduire la quantité d'eau dans la pâte, pour fluidifier ou pour entraîner l'air, ...

1.2.4 Propriétés du béton

Le béton doit être considéré sous deux aspects. Le **béton frais** qui est un mélange de matériaux solides en suspension dans l'eau, se trouve en état foisonné à la sortie de malaxage et en état compacté après sa mise en œuvre dans son coffrage. **Le béton durci**, solide dont les propriétés de résistances mécanique et de durabilité s'acquièrent au cours du déroulement de réactions physico-chimique entre les constituants, d'une durée de quelques jours à quelques semaines.

1.2.4.1 Les propriétés du béton frais [16, 20]

La caractéristique essentielle du béton frais est l'ouvrabilité (maniabilité), qui conditionne non seulement sa mise en place pour le remplissage parfait du coffrage et du ferrailage, mais également ses performances à l'état durci.

Un béton frais doit être facilement maniable et facile à mettre en place. Il doit être aussi homogène et cohésif. Pour remplir toutes ces qualités, les constituants du béton doivent être soigneusement mélangés. Il existe plusieurs facteurs qui affectent la maniabilité d'un béton parmi lesquels : la nature et le dosage du liant, la forme des granulats La granularité et la granulométrie, le dosage en eau

L'ouvrabilité peut s'apprécier de divers façon en particulier par des mesures de plasticité. Il existe de nombreux essais et tests divers permettant la mesure de certaines caractéristiques dont dépend l'ouvrabilité. Il existe un très grand nombre d'appareils de mesure de l'ouvrabilité du béton, reposant sur des principes différents.

L'affaissement du béton se mesure généralement à l'aide « d'un cône d'Abram ».

Le tableau 1.1:4 reprend les domaines d'utilisation du béton en fonction de son ouvrabilité.

Tableau 1.4 : Ouvrabilité du béton suivant l'affaissement [20]

Affaissement en cm	Tolérance	Plasticité	Domaine d'utilisation
0 à 4	± 1 cm	Ferme	Béton de propreté, fondation non armée, voirie,...
5 à 9	± 2 cm	Plastique	Semelle coffrée, mur de soutènement, planché, dallage, poutre, poteau, voile
10 à 15	± 3 cm	Très plastique	Fondation coulée en fouille, pieu, voile de faible épaisseur, paroi moulée
≥16	± 3cm	Fluide	Pieux, parois moulés

Lorsque l'affaissement est trop élevé et se trouve en dehors de la zone de tolérance, il y a risque de ségrégation.

1.2.4.2 Caractéristique du béton durci [16, 20]

Lorsque le béton a durci, sa forme ne peut plus être modifiée mais ses caractéristiques continuent d'évoluer pendant des nombreux mois, voire des années.

a. Résistance à la compression

La résistance à la compression est l'une des propriétés prépondérantes du béton durci. Le béton est très résistant à la compression mais très peu en traction. La résistance à la compression

du béton dépend de la résistance du ciment, du rapport E/C, de la qualité des agrégats (granulats), du degré de compacité du mélange et des conditions de durcissement.

La résistance à la compression du béton est la capacité de celui-ci à supporter les charges qui tendent à réduire sa taille par compression. Elle se mesure sur des éprouvettes normalisées à 28 jours. Les bétons ont une résistance à la compression compris entre 20 et 40 Mpa.

Les classes de résistance à la compression du béton permettent de définir ses domaines d'application en fonction des sollicitations mécaniques et des exigences de durabilité. Le choix d'une classe de béton appropriée est essentiel pour garantir la sécurité, la performance et la longévité des ouvrages. Le tableau 1.5 présente les principales classes de résistance du béton couramment utilisées, ainsi que leurs domaines d'usage habituels

Tableau 1.5 : Classification des types de béton [20]

Classe de résistance à la compression	Usage
C8/10	Usage décoratif
C12/15	Usage décoratif
C16/20	Béton de propreté
C20/25	Fondations légères(semelle filante ou isolée), dallage sur vide sanitaire
C25/30	Dalle : plancher interne à une maison Dalle extérieure classique et dallage sur terreplein ,sans contraintes particulières Voile intérieur ou extérieur, sans contraintes particulières
C30/37	-
C35/45	Béton pour hangar agricole (élevage, fumier,...)
C40/50	-

b. Résistance à la traction

La résistance à la traction des bétons est une autre propriété importante pour évaluer la qualité des bétons. On mesure celle-ci par l'essai de résistance à la traction indirecte aussi appelée essai brésilien ou par fendage. Bien que les bétons ne soient généralement pas conçus pour résister à la traction directe, connaître la résistance à la traction permet d'estimer la charge sous laquelle la fissuration se développe et le comportement de cisaillement du béton.

1.2.5 Classification du béton

La classification s'effectue :

1.2.5.1 Selon la masse volumique ρ D'après la norme NF EN 206-1

Le béton se classe généralement en trois groupes :

- Béton lourd : $\rho > 2600 \text{ kg/m}^3$;
- Béton courant: $2000 < \rho < 2600 \text{ kg/m}^3$;
- Béton léger : $800 < \rho < 2000 \text{ kg/m}^3$;

Les bétons lourds dont les masses volumiques peuvent atteindre $6\,000 \text{ kg/m}^3$ servent, entre autres, à la protection contre les rayons radioactifs. Les bétons courants ($\rho = 2300 \text{ Kg/m}^3$ environ) sont les plus utilisés, aussi bien dans le bâtiment qu'en travaux publics. Ils peuvent être armés lorsqu'ils sont très sollicités en flexion. Les bétons légers trouvent leur utilisation dans la construction des structures de poids réduit.

1.2.5.2 Selon les valeurs des résistances du béton

Les résistances mécaniques en compression obtenues classiquement sur des éprouvettes cylindriques sont de l'ordre de :

- 25 à 35 MPa (béton fabriqué sur chantier (BFC))
- 40 à 60 MPa (béton prêt à l'emploi (BPE))
- jusqu'à 200 MPa (béton hautes performances (BHP))
- 500 MPa (béton ultra hautes performances (BUHP))

1.2.6 Méthode de formulation du béton

L'étude de la composition d'un béton consiste à définir le mélange optimal des différents granulats dont on dispose ainsi que le dosage en ciment et en eau afin de réaliser un béton dont les qualités soient celles recherchées pour la construction de l'ouvrage, ou de la partie d'ouvrage en cause.

Les méthodes proposées sont nombreuses et il n'est pas possible de les citer toutes; elles aboutissent à des dosages volumétriques ou, de préférence, pondéraux, le passage de l'un à l'autre pouvant se faire, si nécessaire, par la connaissance de la densité apparente des granulats en vrac. Ces méthodes sont dites à granularité continue lorsque l'analyse du mélange constituant le béton donne, sur le graphique granulométrique, une courbe s'élevant d'une façon continue ; autrement dit, du plus petit grain de ciment de dimension $d_c \approx 6,3 \mu\text{m}$ au plus gros grain D des graviers, toutes les grosseurs intermédiaires sont représentées.

On dit par contre que l'on a une granularité discontinue lorsque la courbe granulométrique correspondante présente un palier qui équivaut à un manque d'éléments intermédiaires. La recherche des performances passe par la réduction de la porosité du béton durci, c'est à dire de son pourcentage de vide.

1.2.6.1 Méthode de Bolomey [20]

La méthode de Bolomey a le mérite d'avoir ouvert la voie aux études de béton. Toutefois, elle ne peut être appliquée qu'aux granulats dont la masse volumique absolue est comprise entre 2,5 et 2,7 kg/m³.

Par une formule appropriée, on trace une courbe granulométrique de référence et l'on s'efforce de réaliser, avec les granulats dont on dispose, une composition granulaire totale (ciment compris) dont la courbe est aussi proche que possible de la courbe de référence théorique. La formule de base est la suivante :

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

Avec,

P : pourcentage de grains passant à la passoire de diamètre d,

D : diamètre du plus gros grain,

A : le pourcentage d'éléments très fins contenus dans le mélange sec ; éléments qui ont une incidence sur la maniabilité du béton. Cette constante varie de 6 à 16, sa valeur étant d'autant plus élevée que le dosage en ciment est plus fort. Sa valeur dépend de la consistance souhaitée pour le béton et de la provenance des granulats.

Cette méthode aboutit, théoriquement tout au moins, à une granularité continue des granulats et également de module de finesse du sable.

1.2.6.2 Méthode d'Abrams [20]

C'est une règle de mélange fondée sur l'obtention d'un certain module de finesse global pour le mélange de granulats à partir de la connaissance des modules de finesse des granulats à employer. Le module de finesse est la somme des refus en poids divisé par 100, obtenue par certains tamis. Ce module augmente avec la grosseur des agrégats, et est choisi de telle manière que les vides dans ce mélange sont, en principe, réduits au minimum.

1.2.6.3 Méthode de Faury

Cette méthode est venue compléter la méthode de Bolomey. Le principe de Faury est basé sur la granularité continue des granulats, elle s'inspire de la théorie de Caquot relative à la compacité d'un granulat de dimension uniforme correspondant à un serrage moyen. La loi de granulométrie qui en découle est une loi fonction de $\sqrt[5]{D}$

La courbe de référence conduisant à la compacité maximale est normalement une droite mais Faury à distinguer la zone des grains fins et moyens ($D/2$), la courbe granulométrique de référence devient donc un composé de deux segments de droites avec des pentes différentes, l'abscisse du point de rencontre des deux segments correspond à $D/2$ et l'ordonnée Y est donnée par une formule qui tient compte de la nature des granulats et du niveau de consistance recherché :

$$Y = A + 17\sqrt[5]{D} + \frac{B}{\frac{R}{D} - 0.75} \quad (1.2)$$

- A : coefficient qui se choisit dans le tableau des valeurs de A .
- D : dimension maximale du béton.
- B : coefficient dépendant de la puissance de serrage, on le prend égale à 1.5 en cas de serrage moyen (béton mou), et 1.0 en cas de serrage énergétique (béton ferme)
- R : rayon moyen du moule.

1.2.6.4 Méthode de JOISEL [20]

S'inspirant comme Faury de la théorie de Caquot mais en la généralisant, Joisel propose de considérer que la loi de la granulation conduisant à la compacité maximale est fonction de $\sqrt[m]{d}$, m dépendant de la compacité avec la qu'elle se serre un granulat de dimension uniforme selon les moyen de serrage ; peut alors varier de 3 à 10.

Afin d'obtenir une courbe granulométrique de référence qui se réduit à une simple droite, l'échelle des abscisses n'est plus systématiquement proportionnelle à $\sqrt[5]{D}$ (faury) mais à $\sqrt[m]{d}$, m variant avec le serrage des matériaux.

Comme dans la méthode de Faury, on aboutit donc en principe à une granularité continue sauf, bien entendu, si les granulats dont on dispose en pratique présentent une discontinuité. Toutefois, pour éviter la cassure de la droite de référence au point d'abscisse $D/2$, Joisel à

déterminé l'échelle de l'intervalle $\frac{D}{2}$ de façon à n'avoir qu'une simple et unique droite, c'est l'avantage de cette méthode mais, en revanche, il faut employer un graphique dont l'échelle des abscisses est variable d'une étude à l'autre, d'un type de granulats à un autre.

C'est ensuite par une méthode graphique dont nous nous inspirons que se déterminent les pourcentages des divers granulats.

1.2.6.5 Méthodes de calcul de la composition du béton selon G. Dreux [20]

Cette méthode s'inspire des différentes méthodes connues et présente l'avantage d'être simple et rapide.

Cette méthode repose sur l'optimisation du squelette granulaire ; en combinant les courbes granulaires obtenues, il a pu fonder une approche empirique pour déterminer une courbe granulaire de référence ayant la forme de deux droites.

Elle nécessite la connaissance de certaines données de base

a) Nature de l'ouvrage

La connaissance de la nature de l'ouvrage est nécessaire : ouvrage massif ou au contraire élancé et de faible épaisseur, faiblement ou très ferraillé. Il sera nécessaire de connaître l'épaisseur minimale et les dispositions des armatures dans les zones les plus ferraillées : distance minimale entre elles et couvertures par rapport au coffrage.

b) Résistance souhaitée

On demandera en général, une résistance nominale à la compression à 28 jours et compte tenu des dispersions et de l'écart quadratique, il faudra viser une résistance moyenne à 28 jours :

$$f'_{c28j} = f_{c28j} + 15\% * f_{c28j} \quad (1.3)$$

c) Ouvrabilité désirée :

Elle est en fonction de la nature de l'ouvrage (plus ou moins massifs ou plus ou moins ferraillé), de la difficulté du bétonnage, des moyens de serrage, etc..., elle peut se définir en général par la plasticité désirée mesurée par affaissement au cône

d) Dimension maximale des granulats

Le béton tire du granulat une bonne part de résistance et plus particulièrement du gros granulat. Outre la résistance, le dosage en ciment est d'autant moins élevé que les grains sont plus gros.

1.3 Notion sur le béton léger

Le béton léger se distingue par ses propriétés spécifiques qui le rendent adapté à certaines applications du génie civil, notamment dans les domaines où la réduction des charges sont recherchées.

1.3.1 Généralité [21]

Les bétons légers sont, par définition, des bétons dont la masse volumique sèche à l'état durci est comprise entre 1200 et 2000 kg/m³ [22]. Cette réduction de densité résulte soit du recours à des granulats légers, soit de la réduction de la création contrôlée de vides d'air dans le mélange. Grâce à leur faible densité, ces bétons présentent plusieurs avantages : une faible masse volumique, une faible conductivité thermique et une bonne isolation acoustique par rapport aux bétons ordinaires. Par conséquent, ils peuvent apporter une solution technique très intéressante au problème d'isolation thermique et acoustique dans les bâtiments.

Historiquement, les bétons légers ont été employés dans le génie civil dès le début du XX^e siècle, dans les pays développés d'Europe, d'Amérique et d'Asie. Leur développement s'est renforcé avec l'apparition de granulats légers industriels tels que l'argile expansée, les laitiers expansés ou, plus récemment, des matériaux recyclés et organiques comme les copeaux de bois.

Ces deux aspects sont reliés avec la masse volumique qui diminue en remplaçant une quantité de matériaux par de l'air. Ces vides d'air peuvent être incorporés à trois endroits :

- Soit dans les granulats (bétons de granulats légers);
- Soit dans la pâte de ciment (bétons cellulaires) ;

- Ou entre les gros granulats par élimination de granulats fins (bétons sans fines ou caverneux).

La figure 1.1 présente les types des bétons légers

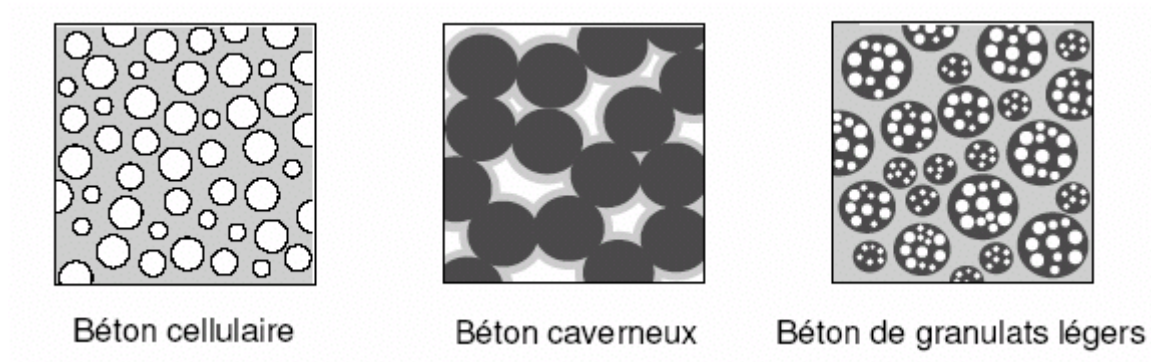


Figure 1.1 : types des bétons légers [23]

Dans chacun des trois cas la réduction de la densité du béton est réalisée par une augmentation des vides d'air dans le béton.

1.3.2 Types de béton légers [23]

Le béton léger se subdivise selon 3 types :

a) Béton cellulaire

Le béton cellulaire est un type de béton dans lequel on ajoute, lors de sa fabrication, un produit d'expansion qui crée un dégagement gazeux générant des cellules dans ce béton.

Les caractéristiques techniques d'un tel béton dépendent de la quantité d'agent d'expansion. Le béton ainsi obtenu possède une masse volumique variant entre 450 et 600 Kg/m³. La résistance en compression se situe entre 3 et 6 MPa. C'est un type de béton qui résiste aux flammes.

L'utilisation la plus courante des bétons cellulaires se limite au béton de remplissage dans les murs, plafonds, planchers ou comme matériaux de remblai.

b) Béton caverneux

Un béton caverneux est constitué du ciment, de gros granulats et de l'eau. Il existe donc des gros vides au sein du béton. C'est la pâte du ciment qui assure l'assemblage des granulats. La résistance à la compression du béton caverneux est comprise entre 1,5 et 14 MPa. Quant à la résistance en flexion, elle est pratiquement égale à 30% de celle en compression.

On emploie principalement les bétons caverneux dans la confection des murs porteurs des bâtiments domestiques et dans les panneaux de remplissage des cadres de structure. Cependant, leur forte absorption d'eau les rend inutilisables dans les fondations.

c) Bétons de granulats légers

Ce sont des bétons courants mais les granulats utilisés sont des granulats légers tels que la vermiculite ou polystyrène expansé, la perlite, la ponce, l'argile expansée, les laitiers expansés, les copeaux de bois, etc.... Comme on a une grande diversité de mélanges possibles, ce qui permet d'obtenir des bétons de granulats légers ayant des propriétés différentes.

1.3.3 Béton Léger à base de copeaux de bois

Le béton léger à base de copeaux de bois représente une alternative innovante visant à valoriser les résidus de bois dans le domaine de la construction. Cette section présente les caractéristiques des copeaux ainsi que l'intérêt de leur incorporation dans la formulation du béton.

1.3.3.1 Généralités sur les copeaux de bois

Dans le cadre de la recherche de matériaux de construction plus légers et plus durables, l'utilisation de granulats d'origine végétale, notamment les copeaux de bois, suscite un intérêt croissant.

Les copeaux de bois sont des résidus issus du sciage, rabotage ou déchiquetage du bois. Ils constituent un granulat léger naturel et renouvelable dont les propriétés varient selon

l'essence, l'âge du bois et les conditions de croissance. Leur faible densité (100 à 350 kg/m³) et leur forte porosité en font un matériau intéressant pour l'allègement du béton.

Cependant, les copeaux présentent une variabilité importante de caractéristiques physico-chimiques et mécaniques, influençant leur compatibilité avec la matrice cimentaire, ce qui nécessite une analyse préalable avant leur incorporation.

1.3.3.2 Intérêt de l'utilisation des copeaux de bois

L'intégration des copeaux de bois dans le béton présente plusieurs avantages. Elle permet notamment de réduire la masse volumique du béton, d'améliorer son isolation thermique et acoustique, et de valoriser les déchets provenant des scieries ou industries forestières.

L'utilisation de copeaux contribue également à la promotion des matériaux écologique, soutenant ainsi les approches de construction durable. Leur caractère bio source et renouvelable constitue un atout majeur dans le contexte actuel de transition énergétique [24,25].

1.3.3.3 Problèmes d'incompatibilité bois-ciment

Malgré leurs nombreux avantages, les copeaux de bois posent plusieurs problèmes lorsqu'ils sont introduits dans la matrice cimentaire.

Les sucres solubles présents dans le bois peuvent inhiber la prise du ciment et retarder le durcissement. De plus, les copeaux présentent une forte capacité d'absorption d'eau, pouvant modifier le rapport eau ciment et affecter la résistance mécanique du béton. Les variations dimensionnelles dues aux changements d'humidité, la faible résistance mécaniques intrinsèques du bois et le risque de dégradation biologique représentent également des défis à surmonter [11, 24].

1.3.3.4 Traitement des copeaux de bois [24,27]

Afin d'améliorer la compatibilité entre le bois et le ciment, plusieurs traitements peuvent être appliqués. Le lavage ou l'immersion des copeaux permet d'éliminer une partie des sucres solubles responsables de l'inhibition de la prise.

La minéralisation, réalisée par enrobage avec une laitance cimentaire ou des solutions minérales, contribue à réduire l'absorption d'eau et à stabiliser les copeaux. L'utilisation de

solutions salines telles que le CaCl ou AlSO_4 peut accélérer la prise du ciment. Enfin, la saturation préalable en eau limite l'absorption excessive pendant le malaxage.

1.3.3.5 Propriétés du béton léger à base de copeaux de bois

Le béton léger élaboré avec des copeaux de bois présente une masse volumique comprise entre 500 et 1600 kg/m^3 , une résistance en compression généralement située entre 1 et 12 Mpa [26].

La structure fibreuse du bois offre également une bonne absorption acoustique, renforçant ainsi l'intérêt de ce matériau dans les applications nécessitant une isolation renforcée. Ces propriétés font du béton bois-ciment un matériau particulièrement adapté pour des usages non structurels ou semi-structurels.

1.4 Conclusion partielle

Ce chapitre a présenté les notions généralités sur le béton, ses constituants, ses propriétés à l'état frais et durci ainsi que les principales méthodes de formulation. Le rôle du ciment, des granulats, de l'eau de gâchage et des adjuvants dans le comportement mécanique et la durabilité du béton a été mis en évidence, avec un accent particulier sur la résistance à la compression.

Une attention particulière a été accordée aux bétons légers, notamment ceux à base de copeaux de bois se distinguant par leur faible masse volumique.

Cependant, l'incorporation des copeaux de bois dans la matrice cimentaire soulève des défis liés à leur forte absorption d'eau, à la présence de composés organiques inhibant la prise du ciment et à la baisse des performances mécaniques. Des traitements spécifiques sont donc nécessaires afin d'améliorer la compatibilité bois-ciment et d'optimiser les propriétés du béton obtenu.

Ces éléments théoriques constituent la base scientifique de l'étude expérimentale présentée dans le chapitre suivant, consacrée à l'analyse du comportement mécanique du béton léger à base de copeaux de bois.

Chapitre 2 Matériels et Méthodologie de travail

2.1 Introduction

Dans cette partie consistera à présenter les matériaux, les matériels et procédure utilisés pour réaliser l'étude et obtenir les résultats escomptés.

En premier lieu, il sera question de présenter et déterminer les caractéristiques de différents constituants du béton par un certain nombre d'essais comme les essais sur le ciment et l'analyse granulométrique et les essais pour déterminer les propriétés physiques des granulats utilisées: Concassés. En deuxième lieu, elle consistera à une présentation de la méthode de formulation des bétons dont il est question. Et en fin présenter les essais qui permettent de caractériser les propriétés du béton notamment la consistance du béton et la résistance à la compression, tout en présentant les modes opératoires de différents essais dans le laboratoire.

2.2 Natures et Origine des matériaux

Les constituants des bétons utilisés sont de diverses natures et origines. Dans cette section nous présentons respectivement la nature et l'origines des différents constituants du béton.

2.2.1 Copeaux de bois

Les copeaux de bois utilisés pour remplacer les graviers, proviennent de processus de rabotage du bois dans la scierie localisée dans la ville de GOMA. La figure 2.1 représente les copeaux de bois mouillés.



Figure 2.1 : Les copeaux de bois mouillés

2.2.2 Ciment

Le ciment utilisé dans cette étude est le ciment CIMERWA produit au Rwanda, de classe commerciale 42,5 .

2.2.3 Eau de gâchage

L'eau utilisée dans cette étude est une eau potable fournie par la REGIDESO, et recueilli au robinet

2.2.4 Granulats

Le sable utilisé dans cette étude, est le sable roulé provenant de Idjwi. Il est essentiel à la compaction et à la résistance du béton [2].

Les graviers utilisés sont des concassés de dimension 4/8 ,8/15 et 15/25. Les figures 2.2,2.3,2.4 et 2.5 présentent les différents granulats utilisés



Figure 2.2: Sable roulé



Figure 2.3 : Concassé 4/8



Figure 2.4: Concassé 8/15



Figure 2.5: Concassé 15 /25

2.3. Caractérisation des matériaux

Dans cette partie nous présentons la caractérisation des différents composant du béton.

2.3.1. Analyse granulométrique [28]

La composition granulométrique d'un granulat est déterminée par l'essai d'analyse granulométrique, réalisé conformément à la norme **NF EN 933-1(2012)**. Cette section décrit l'objectif de l'essai, son principe, la procédure expérimentale ainsi que la présentation des résultats obtenus.

a. But de l'essai

L'analyse granulométrique vise à déterminer la distribution pondérale des grains constituant un granulat en fonction de leurs dimensions. Cette répartition est représentée graphiquement sous forme de courbe granulométrique, permettant d'apprécier la proportion des différentes tailles des particules.

b. Principe

L'essai consiste à séparer un matériau granulaire en plusieurs classes de tailles décroissantes à l'aide d'une série de tamis normalisés. Après le tamisage, les masses retenues sur chaque tamis sont mesurées puis rapportées à la masse initiale de l'échantillon. Les pourcentages obtenus servent ensuite à tracer la courbe granulométrique et à analyser la distribution des particules.

c. Mode Opératoire

La procédure expérimentale adoptée suit les prescriptions de la norme **NF EN 933-1(2012)** et comprend les étapes suivantes :

- Nettoyer soigneusement les tamis à l'aide d'une brosse métallique
- Disposer les tamis en colonne en respectant l'ordre décroissant des ouvertures des mailles en fonction du matériau (31,5mm ; 25mm ; 20mm ; 16mm ; 12,5mm ; 10mm ; 8mm ; 6,3mm ; 5mm ; 4mm ; 3,15mm ; 2,5mm ; 1,6mm ; 0,8mm ; 630 μ m ; 400 μ m ; 315 μ m ; 250 μ m ; 160 μ m ; 125 μ m ; et 80 μ m)

- Introduire l'échantillon de Masse M_s sur le tamis supérieur de la colonne, après l'avoir lavé et passé à l'étuve pendant 24 heures à 105°C ;
- Mettre en place le couvercle ;
- Fixer la colonne des tamis sur le vibrotamis ;
- Effectuer le tamisage de manière discontinue ;
- Peser les refus cumulés des tamis, en commençant par celui du tamis supérieur ;
- Exprimer les refus cumulés par rapport à la masse initiale M_s , et déduction des pourcentages des tamisât cumulés.

d. Appareillage

La réalisation de cet essai nécessite :

- Une série de tamis normalisés,
- Une balance de précision,
- Des récipients de collecte,
- Une tamiseuse mécanique.

Les figures 2.6 et 2.7 représentent respectivement une balance de précision et une tamiseuse mécanique



Figure 2.6: Balance de précision



Figure 2.7 : Tamiseuse électrique

e. Expression des résultats

Les résultats sont présentés sous forme de courbes granulométriques. Sur ces courbes, les abscisses représentent les dimensions des tamis (modules AFNOR) tandis que les ordonnées indiquent les pourcentages cumulés de tamisât $P_j(\%)$. Le pourcentage cumulé passant au tamis j est déterminé par la relation (2.1)

$$P_j(\%) = \left(1 - \frac{\sum M_i^r}{M_s} \right) \cdot 100 \quad (2.1)$$

Avec :

M_i^r : Masse du refus du tamis numéro i , avec $1 \leq i \leq j$

M_s : Masse de l'échantillon sec

Pour les sables, le module de finesse caractérise sa grosseur. Le module de finesse est obtenu en divisant par 100 la somme des pourcentages des refus des tamis de dimensions : 0,16 ; 0,315 ; 0,63 ; 1,25 ; 2,5 et 5mm. Il est souhaitable que le module de finesse d'un sable pour béton soit compris entre 2,2 et 2,8.

2.3.2. Le degré de propreté du sable [28]

Le degré de propreté du sable est évalué à l'aide de l'essai d'équivalent de sable, réalisé conformément à la norme NF EN 933-8 (1999). Cette section présente l'objectif, le principe, la procédure expérimentale ainsi que l'expression et l'interprétation de résultats.

a. But de l'essai

L'essai d'équivalent de sable permet d'évaluer la propreté d'un sable en estimant la proportion de grains utiles par rapport aux éléments fins argileux ou poussiéreux qu'il contient.

b. Principe

Le principe de l'essai d'équivalent de sable consiste à introduire une masse déterminée de sable dans deux éprouvettes graduées contenant une solution lavante, afin d'évaluer en pourcentage la proportion du sable brut par rapport aux impuretés le contenant.

c. Mode opératoire

L'essai d'équivalent de sable est réalisé sur un échantillon sec de sable, équivalent à 120g, conformément aux prescriptions de la norme NF EN 933-8 (1999). La procédure suivie comprend:

- Remplissage de deux éprouvettes avec la solution lavante jusqu'au premier repère, puis introduire la masse de sable pesée;
- Elimination des bulles d'air en tapotant les éprouvettes et laisser reposer pendant 10 minutes;
- Bouchage des éprouvettes suivit de l'agitation à l'aide d'un agitateur mécanique faisant un mouvement rectiligne, horizontal, sinusoïdal de 20 cm d'amplitude à l'aide d'une machine à secouer (90 allers et retours en 30 secondes) ;
- Rinçage des parois internes et bouchage à l'aide du tube laveur en rinçant le bouchon, tout en faisant remonter et descendre lentement le tube ainsi les fines remontent en surface ;
- Compléter avec la solution lavante jusqu'au repère supérieur et retirer le tube ;
- Laisser reposer les éprouvettes pendant 20 minutes en évitant toute vibration ;
- Mesure à vue des hauteurs h_1 et h_2 (h_2 est entachée d'incertitude)
- Mesure à piston de la hauteur h'_2 , pour plus précision ;

d. Appareillage

Pour effectuer cet essai nous avons besoin des tubes ou éprouvettes ; règle ; piston ; agitateur mécaniques ; récipients de mesure. La figure 2.8 représente un agitateur mécanique, piston et des éprouvettes



Figure 2.2 : Agitateur ,piston ; éprouvettes

e. Expression des résultats

Les résultats de l'équivalent de sable s'expriment en pourcentage. Ils se calculent à partir de la relation (2.2)

$$ES = \frac{h_2}{h_1} \times 100 \quad (2.2)$$

Avec :

h_2 (cm): La hauteur du dépôt de sable visible.

h_1 (cm) : La hauteur totale y compris le floculat (fines en suspension)

f. Interprétation des résultats

A l'issue des résultats de l'essai d'équivalent de sable, celui-ci est classifié selon le degré de propreté .Le Tableau 2.1 représente les valeurs de l'équivalent sable associées à la nature du sable.

Tableau 2.1: Les valeurs de l'équivalent de sable [28]

ES à vue	ES au piston	Nature et qualité du sable
ES<65%	ES<60%	Sable argileux : risque de retrait ou de gonflement. Sable à rejeter pour le béton de qualité.
65%≤ES≤75%	65%≤ES≤75%	Sable légèrement argileux de propreté admissible pour les bétons de qualité courante quand le retrait n'a pas de conséquence notable sur la qualité du béton.
75%≤ES≤85%	70%≤ES≤80%	Sable propre à faible proportion de fines argileuses convenant pour les bétons de haute qualité.
ES>85%	ES>80%	Sables très propres. L'absence presque totale des fines argileuses risque d'entraîner un défaut de plasticité du béton qu'il faudra compenser par une augmentation du dosage en eau.

2.3.3. Masse volumique apparente des granulats [28]

La masse volumique apparente est déterminée suivant la norme NF P 18-555 [29]. Nous présentons le but, le principe, le mode opératoire, l'appareillage ; l'expression des résultats et l'interprétation des résultats.

a. But de l'essai

Cet essai permet de déterminer la masse volumique apparente d'un volume donné de granulat en vrac, incluant les vides perméables et imperméables de la particule ainsi que les vides entre particules.

b. Principe

Le principe de l'essai consiste à remplir une mesure de 1m³ par les granulats secs afin d'en déduire sa masse par unité de volume.

c. Mode opératoire

Le mode opératoire suivie dans la détermination de la masse volumique apparente est conforme aux prescriptions de la norme NF P 18-555 (1990) [29]. Il se présente comme suit :

- Séchage des granulats préalablement lavés à l'étuve pendant 24h à 105°C ;
- Versement de l'échantillon dans un volume avec deux mains à 10 cm environ au-dessus (comme présenté à la Figure II.2);
- Arasage à la règle le débordement ;
- Pesage du contenu et prise de M_s la masse correspondante ;

d. Expression des résultats

Les résultats de l'essai de masse volumique apparente sont exprimés en g/cm^3 et se calculent à partir de la relation (2.3).

$$\varphi = \frac{M_s}{V} \quad (2.3)$$

Avec

M_s : Masse du matériau sèche en g

V : Volume du récipient en cm^3

2.3.4. Masse volumique absolue des granulats [28]

La masse volumique absolue est déterminée par la norme NF P 18-555(1990) [29]. Elle représente la masse volumique réelle de la matière solide constituant le granulat.

a. But de l'essai

Le but de l'essai de masse volumique absolue est d'exprimer la masse par unité de volume de la matière qui constitue le granulat sans tenir compte des vides le constituant.

b. Principe

Le volume absolu d'un corps est généralement déterminé en mesurant le volume d'un liquide (en général de l'eau) que déplace l'introduction de ce corps.

c. Mode opératoire

La détermination de la masse volumique absolue s'effectue sur des granulats secs, d'environ 300g de masse sèche notée M_s . L'essai consiste à :

- L'introduction d'une quantité V_1 d'eau dans une éprouvette graduée ;
- L'introduction des granulats secs de masse M_s dans l'éprouvette graduée contenant de l'eau ;
- Elimination des bulles d'air
- Saturation des granulats dans l'éprouvette (au moins 24 heures)
- Prise du volume V_2 correspondant

d. Expression des résultats

Les résultats de l'essai de masse volumique absolue se sont exprimés en g/cm^3 et se calculent à partir de la relation (2.4)

$$\varphi_{Abs} = \frac{M_s}{V_2 - V_1} \quad (2.4)$$

Avec :

M_s : Masse sèche de l'échantillon ;

V_2 : Volume d'eau avec les granulats,

V_1 : Volume d'eau dans l'éprouvette gradué

Les granulats sont classifiés en fonction de leurs masses volumiques d'après le Tableau 2.2

Tableau 2.2 : Classification des granulats suivant les masses volumiques [30]

Nature des Granulats	Masse volumique
Granulats légers	$M_{v_{abs}} < 2 \text{ t/m}^3$
Granulats courants	$2 \text{ t/m}^3 < M_{v_{abs}} < 3 \text{ t/m}^3$
Granulats lourds.	$M_{v_{abs}} > 3 \text{ t/m}^3$

2.3.5. Taux d'absorption d'eau des granulats

Le taux d'absorption des granulats est déterminé par un essai normalisé NF P 18-555 (1990) [29].

a. But de l'essai

Le but de l'essai d'absorption d'eau est de déterminer la quantité en eau qu'absorbe le granulat en présence de l'eau.

b. Principe

L'essai consiste à évaluer l'augmentation de masse d'un granulat après immersion, rapportée à sa masse sèche.

c. Mode opératoire

Le mode opératoire employé dans la détermination du coefficient d'absorption d'eau se présente comme suit :

- Immersion de l'échantillon de sable ou de gravier dans l'eau pendant 24 heures à 20°C à la pression atmosphérique ;
- Etalage de l'échantillon sur une surface plane non absorbante ;
- Elimination de l'eau de surface avec l'air sec au séchoir pour le sable et avec un tissu pour le gravier ;
- Pesage de la masse M_a ;
- Séchage de la masse M_a pendant 24 heures à 105°C±5 pour obtenir la masse M_s .

d. Expression des résultats

Les résultats de l'essai d'absorption d'eau des granulats s'expriment en pourcentage et se calculent à partir de la relation (2.5).

$$A_b = \frac{M_a - M_s}{M_s} \times 100(\%) \quad (2.5)$$

Avec :

M_a en (g): la masse humide ;

M_s en (g): la masse sèche

2.3.6. Essai de Los Angeles [28]

a. But de l'essai

L'essai Los Angeles permet d'évaluer la résistance des granulats aux chocs et l'usure par frottement. Par chocs et à l'usure par frottements réciproques des éléments d'un granulat.

b. Principe

L'essai consiste à mesurer la quantité d'éléments inférieurs à 1,6 mm produite en soumettant le matériau aux chocs de boulets normalisés et aux frottements réciproques dans la machine Los Angeles. La granularité du matériau soumis à l'essai est choisie parmi six granularités-types, de la classe granulaire 4/6,3 mm – 6,3/10 mm – 10/14 mm – 10/25 mm – 16/31,5 mm et 25/50 mm, se rapprochant au mieux de la granularité du matériau tel qu'il sera mis en œuvre.

c. Mode opératoire

- Préparer l'échantillon de granulats séché à l'étuve (5 000 grammes en général)
- Introduire les granulats et la charge de boulets d'acier, 11 boulets, dans la machine Los Angeles
- Faire effectuer 500 rotations à une vitesse de 31 à 33 tr/min
- Recueillir le matériau, le tamiser au tamis de 1,6 mm.

d. Appareillage

- Machine de Los Angeles
- Tamis
- Balance de précision

La figure 2. 9 représente la machine de Los Angeles



Figure 2.3 :Appareil de Los Angels

e. Expression des résultats

Le poids de la charge de boulets varie en fonction du type de granularité. Si P est le matériau soumis à l'essai, p le poids des éléments inférieurs à 1,6 mm produits au cours de l'essai, la résistance combinée à la fragmentation par chocs et à l'usure par frottements réciproques s'exprime par la quantité :

$$C_{LA} = \frac{p}{P} \times 100 \quad (2.6)$$

Plus le coefficient Los Angeles « LA » est faible, plus le granulat est résistant à la fragmentation par chocs.

f. Interprétation des résultats

Les valeurs de coefficient Los Angeles indiquent la nature du gravier et permettent d'apprécier leurs qualités pour composer un béton. Le tableau 2.3 représente les qualités des granulats selon les valeurs du coefficient de Los Angeles.

Tableau 2.3 :Qualité des granulats [25]

Valeurs du coefficient de Los Angeles	Qualités des granulats
$LA \leq 15$	Très bon à bon
$15 < LA \leq 25$	Bon à moyen
$25 < LA \leq 40$	Moyen à faible
$LA > 40$	Médiocre , mauvaises qualités

Le coefficient de Los Angeles ne doit pas excéder 45 pour les granulats pour béton. Les granulats utilisés dans la construction de chemin de fer doivent avoir un coefficient de Los Angeles compris entre 15 et 25. Les granulats utilisés dans la construction routière quant à eux, doivent avoir un coefficient de Los Angeles compris entre 25 et 35.

2.4. Essais sur les liants hydrauliques (Ciment)

Les essais effectués sur le ciment sont les suivants l'essai de consistance ; l'essai de prise (début et fin de prise), la détermination de la masse volumique absolue ; la détermination de la classe vraie du ciment.

2.4.1. Essai de consistance [28]

La consistance normale du ciment est déterminée par l'essai normalisé [31].

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.

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 $6 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$.

d. Appareillage

- Appareil de Vicat (avec sonde)
- Balance de précision.

La figure 2.10 représente l'appareil de Vicat avec sonde



Figure 2.4 : Appareil de Vicat avec Sonde

2.5. Traitement des copeaux de bois par enrobage cimentaire

a. But du traitement

Le traitement par enrobage des copeaux de bois avec la pâte cimentaire vise principalement à améliorer la cohésion entre les copeaux de bois et la matrice cimentaire et réduire l'absorption d'eau des copeaux de bois.

b. Principe du traitement

Le principe repose sur l'application d'une couche de pâte cimentaire sur les copeaux de bois, permettant ainsi d'imperméabiliser leur surface et d'améliorer leur compatibilité avec le ciment.

c. Mode opératoire

- Les copeaux de bois sont d'abord nettoyés et séchés
- Mélange du ciment et de l'eau afin d'obtenir la pâte cimentaire homogène

- Les copeaux sont ensuite enrobés de cette pâte cimentaire, en veillant à bien recouvrir chaque copeau
- Après l'enrobage, les copeaux sont laissés à sécher pour permettre à la pâte de bien durcir et de former une couche protectrice.

2.6. Formulation du béton : méthode de Dreux Gorisse

La formulation d'un béton consiste à déterminer les quantités et les caractéristiques des constituants, de manière à satisfaire les exigences fixées.

Plusieurs méthodes sont proposées pour la formulation des bétons parmi lesquelles la méthode pratique simplifiée dite méthode de Dreux GORISSE. Elle permet de définir de façon simple les quantités de constituants et intègre une proportion importante de graviers qu'elle intègre dans ses formulations

2.6.1. Objectif de la méthode

L'objectif de la formulation est de déterminer les quantités d'eau, ciment et granulats nécessaires pour produire 1 m³ de béton répondant aux exigences de résistance et de maniabilité.

2.6.2. Critère de résistance

Le béton doit être formulé pour qu'à 28 jours sa résistance moyenne en compression atteigne la valeur caractéristique σ'_{28} présentée par la formule (2.7).

Cette valeur doit, par mesure de sécurité, être supérieure de 15 % à la résistance minimale en compression f_{c28} nécessaire à la stabilité de l'ouvrage

$$\sigma'_{28} = 1,15 \times f_{c28} \quad (2.7)$$

2.6.3. Choix du ciment

Le choix du type de ciment est fonction de la valeur de sa classe vraie σ'_c et des critères de la mise en œuvre (vitesse de prise et de durcissement, chaleur d'hydratation, etc...). La classe vraie du ciment est la résistance moyenne en compression obtenue à 28 jours sur des éprouvettes de mortier normalisé.

2.6.4. Formulation de Dreux-Gorisse [20]

La méthode de formulation de Dreux-Gorisse permet de déterminer les quantités optimales de matériaux (eau E, ciment C, sable S, gravillon g et gravier G) nécessaires à la confection d'un mètre cube de béton conformément au cahier des charges. L'élaboration de la formulation théorique repose sur plusieurs étapes successives :

- Détermination du rapport C/E
- Détermination du mélange optimal à minimum de vide
- Détermination de la compacité du béton
- Détermination des masses de granulats

2.6.5. Détermination du rapport C/E

Le rapport C / E est calculé grâce à la formule de Bolomey :

$$\sigma_{28} = G * \sigma'_c * (E^C - 0,5) \quad (2.8)$$

Ou' :

- σ_{28} = Résistance moyenne en compression du béton à 28 jours en MPa
- σ'_c = Classe vraie du ciment à 28 jours en MPa
- C = Dosage en ciment en kg par m³ de béton
- E = Dosage en eau total sur matériau sec en litre par m³ de béton
- G' = Coefficient granulaire fonction de la qualité et de la dimension maximale des granulats

Le tableau 2.4 représente la valeur du coefficient granulaire en fonction de la qualité et la dimension maximale des granulats

Tableau 2.4 : Coefficient granulaire G' en fonction de la qualité et la dimension maximale des granulats D_{max} [20]

Qualités des granulats	Dimension maximale des granulats D_{max}		
	Petits ($D \leq 12,5$ mm)	Moyens ($20 \leq D \leq 31,5$ mm)	Grossier ($D \geq 50$ mm)
Excellente	0,55	0,60	0,65
Bonne, courante	0,45	0,50	0,55
Passable	0,35	0,40	0,45

La valeur de C est déterminée grâce à l'abaque de la figure 2.12 en fonction des valeurs de C/E et de l'affaissement au cône d'Abrams.

La figure 2.11 représente l'abaque permettant d'évaluer approximativement le dosage en ciment

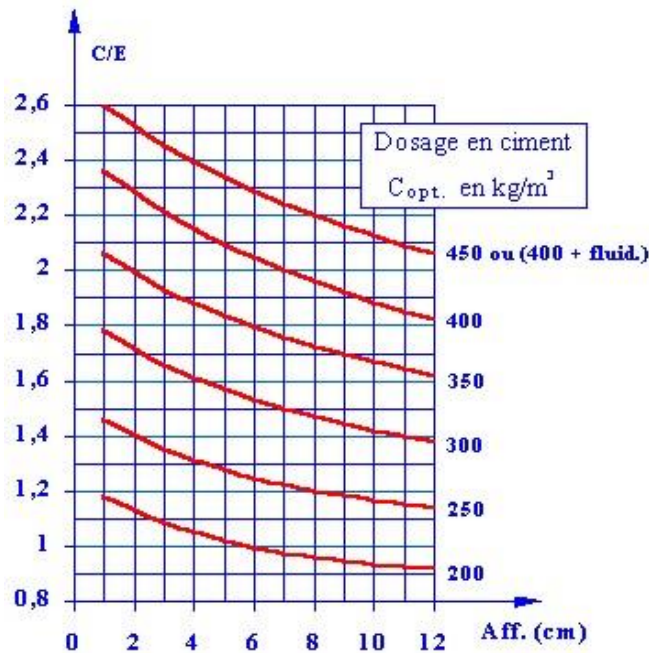


Figure 2.5 :Abaque permettant d'évaluer approximativement le dosage en ciment [26]

Pour cela il suffit de positionner sur l'abaque les valeurs de C/E et de l'affaissement au cône recherchées. Le point ainsi obtenu doit être ramené parallèlement aux courbes de l'abaque pour déterminer la valeur optimale de C_{opt} . Au-delà de 400 kg de ciment par m^3 de béton, on préférera à un surdosage en ciment l'usage d'un fluidifiant. La quantité d'eau E nécessaire à la confection du béton se calcule grâce aux valeurs de C/E et de C.

2.6.6. Corrections sur le dosage en ciment C et le dosage en eau E

Lorsque la dimension maximale des granulats D_{max} est différente de 20 mm, une correction sur la quantité de pâte est nécessaire à l'obtention de la maniabilité souhaitée. Les corrections sont à apporter sur les quantités d'eau et de ciment (le rapport C/E reste inchangé). Le tableau 2.5 représente les corrections sur le dosage en eau en fonction de D_{max} .

Tableau 2.5 :correction sur le dosage en eau en fonction de D_{max} [20]

Dimension maximale des granulats (D_{max} en mm)	5	8 à 10	12,5 à 16	20 à 25	31,5 à 40	50 à 63,4	80 à 100
Correction sur le dosage en eau (en %)	+ 15	+ 9	+ 4	0	- 4	- 8	- 12

2.6.7. Détermination du mélange optimal à minimum de vides

Il s'agit de déterminer les pourcentages de sable, de gravillons et de cailloux qui vont permettre la réalisation d'un squelette granulaire à minimum de vides. Les quantités des matériaux de chaque classe granulaire doivent être judicieuses pour que les plus petits éléments viennent combler les vides laissés par les plus gros. La courbe granulométrique théorique d'un matériau à minimum de vides peut être schématisée par une droite brisée. La démarche proposée par Dreux pour déterminer le mélange optimum à minimum de vides est la suivante :

- Tracé de la droite brisée de référence
- Détermination des pourcentages en volumes absolus de matériaux

A. Tracé de la droite de référence de Dreux :

La droite de référence de Dreux représente la courbe idéale d'un matériau à minimum de vides. C'est une droite brisée dont le point de brisure est défini par son abscisse X et son ordonnée Y :

En abscisse :

- Si $D_{max} \leq 20 \text{ mm}$,

$$X = \frac{D_{max}}{2} \quad (2.9)$$

- Si $D_{max} > 20 \text{ mm}$,

$$Module(X) = \frac{[Module(D_{max}) + 38]}{2} \quad (2.10)$$

En ordonnée :

$$Y = 50 - \sqrt{D_{max}} + K + K_S + K_P \quad (2.11)$$

Où :

- Y est donné en pourcentage de passants cumulés
- K est un coefficient donné, K_S et K_P étant des coefficients correctifs définis par :
 - K_S (correction supplémentaire fonction de la granularité du sable) :

$$K_S = (6 * M_f - 15) \quad (2.12)$$

avec M_f le module de finesse du sable.

- K_p (correction supplémentaire si le béton est pompable) : $K_p = +5$ à $+10$ selon le degré de plasticité désiré.

Le tableau 2.6 représente les valeurs de K en fonction des granulats, du mode de vibration et du dosage en ciment

Tableau 2.6 : K en fonction de la forme des granulats, du mode de vibration et du dosage en ciment [19]

Vibration		Faible		Normale		Puissante	
Forme des granulats (du sable en particulier)		Roulé	Concassé	Roulé	Concassé	Roulé	Concassé
Dosage en Ciment	400 + Fluide	- 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

La droite de Dreux a pour origine le point O origine du graphe et pour extrémité le point D_{max} caractéristique des plus gros granulats.

2.6.8. Détermination des pourcentages en volumes absolus de matériaux

Pour déterminer les pourcentages en volumes absolus de granulats permettant la confection d'un mélange à minimum de vide il est nécessaire de tracer des droites reliant deux à deux les courbes granulométriques des matériaux du mélange.

Ces droites sont définies par 5 % de refus pour le matériau à faible granularité et par 5

% de passant pour le matériau à forte granularité. L'intersection des droites ainsi tracées avec la droite brisée de Dreux permet, par prolongement sur l'axe des ordonnées, de déterminer les pourcentages en volumes absolus de chaque matériau. Ces pourcentages doivent permettre l'obtention d'un mélange dont la courbe granulométrique est proche de la droite brisée de Dreux. Si la courbe du mélange obtenue est trop éloignée de la courbe de Dreux, un ajustement de ces pourcentages peut s'avérer nécessaire. La figure 2.12 représente la détermination des pourcentages en volumes absolus de granulats.

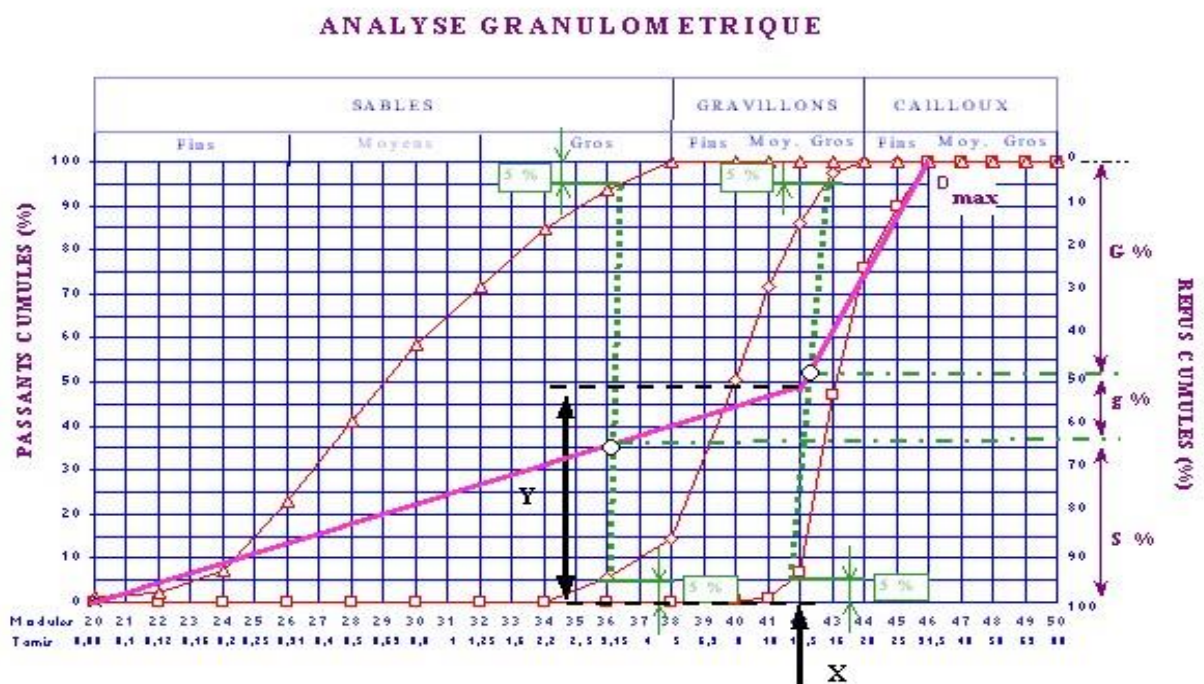


Figure 2.6 :Détermination des pourcentages en volumes absolus des granulats

2.6.9. Détermination de la compacité du béton

Pour déterminer les masses de granulats entrant dans la composition de béton, il est nécessaire de déterminer la compacité du béton qui correspond au volume absolu en m^3 de solide contenu dans un mètre cube de béton (volumes absolus de ciment, de sable, de gravette et de gravier). Sa valeur de base c_0 est fonction de la taille des granulats, de la consistance du mélange et des moyens de vibration mis en œuvre.

Des corrections (c_1 , c_2 et c_3) fonctions de la forme des granulats, de la masse volumique des granulats et du dosage en ciment, doivent être apportées :

$$c = c_0 + c_1 + c_2 + c_3 \quad (2.13)$$

La valeur de la compacité c du béton permet de déterminer le volume total absolu V de granulats intervenant dans la formulation du béton :

$$V = (c - V_c) \quad (2.14)$$

$$V_c = (c - \rho_c) \quad (2.15)$$

où $\rho_s(c)$ est la masse volumique absolue du ciment utilisé.

Le tableau 2.7 représente les différentes valeurs du coefficient de compacité du béton

Tableau 2.7 : Compacité du béton en fonction de D_{max} , de la consistance et du serrage [32]

Consistance	Serrage	compacité (c_0)						
		D_{max} = 5	D_{max} = 8	D_{max} =12,5	D_{max} = 20	D_{max} =31,5	D_{max} = 50	D_{max} = 80
Molle (TPFluide)	Piquage	0,750	0,780	0,795	0,805	0,810	0,815	0,820
	Vibration faible	0,755	0,785	0,800	0,810	0,815	0,820	0,825
	Vibration normale	0,760	0,790	0,805	0,815	0,820	0,825	0,830
Plastique (P)	Piquage	0,760	0,790	0,805	0,815	0,820	0,825	0,830
	Vibration faible	0,765	0,795	0,810	0,820	0,825	0,830	0,835
	Vibration normale	0,770	0,800	0,815	0,825	0,830	0,835	0,840
	Vibration puissante	0,775	0,805	0,820	0,830	0,835	0,840	0,845

Ferme (F)	Vibration faible	0,775	0,805	0,820	0,830	0,835	0,840	0,845
	Vibration normale	0,780	0,810	0,825	0,835	0,840	0,845	0,850
	Vibration puissante	0,785	0,815	0,830	0,840	0,845	0,850	0,855

Nota :

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

Sable roulé et gravier concassé ($c_1 = - 0,01$)

Sable et gravier concassé ($c_1 = - 0,03$)

*** Pour les granulats légers on pourra diminuer de 0,03 les valeurs de c : ($c_2 = -0.03$) * Pour un dosage en ciment $C \neq 350 \text{ kg/m}^3$ on apportera le terme correctif suivant :**

$$c_3 = (C - 350) / 5000$$

2.6.10. Détermination des masses de granulats

Connaissant le volume total absolu des granulats (V) et les pourcentages en volume absolue de sable (S %), de gravillon (g %) et de gravier (G %), il est alors possible de déterminer les volumes de sable (V_s) de gravillon (V_g) et de gravier (V_G) ainsi que leurs masses respectives (S, g et G) :

$$V_s = V * S \% \quad \text{et} \quad S = V_s * \rho_s(S)$$

$$V_g = V * g \% \quad \text{et} \quad g = V_g * \rho_s(g)$$

$$V_G = V * G \% \quad \text{et} \quad G = V_G * \rho_s(G)$$

2.6.11. Obtention de la formulation théorique de béton

La formulation théorique de béton recherchée est définie par les quantités d'eau E, de sable S, de gravillon g et de gravier G. La masse totale d'un mètre cube de béton $\Delta o = (E + C + S + g + G)$ est pour un béton courant comprise entre 2,3 t/m³ et 2,5 t/m³. La formulation obtenue reste

théorique et il convient de la tester et de la corriger par des essais de laboratoire avant d'être utilisée.

2.7. Caractérisation du béton

La détermination de certaines caractéristiques des bétons est effectuée à travers des essais normalisés, notamment l'essai de consistance, l'essai de densité du béton frais et l'essai de la résistance à la compression.

2.7.1. La consistance

La consistance du béton est déterminée par le cône d'Abram selon la norme NF P 18-451 (1990) [33]. Cette section présente le but, le principe, le mode opératoire et l'expression des résultats.

a. But de l'essai

Le but de l'essai de consistance du béton est d'exprimer l'ouvrabilité du béton afin de faciliter sa mise en œuvre et sa mise en place.

b. Principe

Le principe de l'essai de consistance est d'évaluer l'affaissement du béton frais par son propre poids au cône d'Abrams .

c. Mode opératoire

Le mode opératoire employé est conforme à la norme NF P 18-451 (1990) [33]. Elle consiste à :

- La mise en place du cône d'Abrams,
- Le remplissage du cône avec du béton frais en trois couches piquetées à 25 coups par couche ;
- L'arasage du cône avec une tige ;
- Le démoulage du cône ;
- La mesure de l'affaissement du béton frais au point le plus haut affaissé ;

d. Appareillage

C'est un moule en métal (acier zingué). Sa forme est tronconique (dimensions : $D = 20\text{cm}$, $d = 10\text{cm}$, $h = 30\text{cm}$) et il est muni de poignées. L'entonnoir de remplissage, qui sert à faciliter le remplissage du cône. Le plateau support en métal, sur lequel le cône est posé lors du remplissage. La figure 2.13 représente le cône d'Ahraham.



Figure 2.7 : Cône d'Abraham

e. Expression des résultats

Les résultats de l'essai de consistance s'expriment en hauteur de béton affaissée au cône d'Abrams qui permet de classer le béton comme le montre le Tableau 2.8.

Tableau 2.8 : Classe de consistance des bétons [34]

Affaissement en cm	Plasticité	Mise en œuvre	Domaine d'utilisation
0 à 4	Ferme	Puissante	Béton de propreté
5 à 9	Plastique	Normale	Semelle coffrée ; mur de soutènement ; poutre
10 à 15	Très plastique	Faible	Pieu ; fondation coulée en fouillee
Supérieure à 15	Fluide	Léger piquage	Pieu

2.7.2. Densité du béton frais

La densité du béton frais ou la densité réelle du béton est déterminée par un essai normalisé NF P 18-459 (2010) [35]. Cette section présente le but, le principe, le mode opératoire, l'expression et l'interprétation des résultats.

a. But de l'essai

Le but de la détermination de la densité frais du béton est celui d'évaluer sa réelle densité par rapport à la densité théorique obtenue par calcul dans la formulation.

b. Principe

Le principe de cet essai consiste à remplir un volume V d'une masse de béton frais légèrement piqueté afin d'évaluer sa densité passant par la masse volumique.

c. Mode opératoire

Le mode opératoire utilisé est conforme à la norme NF P 18-459 (2010) [35]. Il se présente comme suit :

- Mesurer la masse M_0 à vide du moule
- Peser la masse M_1 du moule rempli avec le béton ;

d. Expression des résultats

Les résultats de l'essai de densité réelle du béton s'obtiennent à partir de la relation (2.16)

$$d = \frac{\frac{M_1 - M_0}{V}}{1000} \quad (2.16)$$

Où :

- M_0 est la masse du moule à vide ;
- M_1 la masse du moule rempli avec le béton et ;
- V le volume du moule

e. Interprétation des résultats

Le tableau 2.9 permet de classifier le béton suivant sa densité

Tableau 2.9 : Classification des bétons selon les densités [27]

Type des bétons	Densité
Béton très lourd	$\geq 2,5$
Béton lourd	$1,8 \leq d \leq 2,5$
Béton léger	$0,5 \leq d \leq 1,8$
Béton très léger	$\leq 0,5$

2.7.3. Résistance à la compression

La résistance à la compression du béton est déterminée par un essai normalisé NF P 18-406 (1981) dont l'objectif est d'évaluer la résistance du béton soumis à un effort de compression. Le principe de cet essai consiste à appliquer un effort normal de compression sur une éprouvette de béton normalisée jusqu'à la rupture.

Les résultats de l'essai sont présentés sous forme de contraintes en Mpa et sont déterminés à partir de la relation :

$$f_{c28} = \frac{P}{S} \quad (2.17)$$

Avec f_{c28} : la résistance à la compression

P : la charge de rupture en KN

S : la section orthogonale de l'éprouvette en mm^2

2.8. Conclusion partielle

Ce chapitre a présenté les matériaux utilisés, les équipements mobilisés et la démarche expérimentale adoptée.

Des essais normalisés ont permis de caractériser les matériaux (granulométrie, propreté du sable, masses volumiques, absorption d'eau, résistance à l'usure et propriétés du ciment). Les copeaux

de bois ont été préalablement traités par enrobage cimentaire afin d'améliorer leur compatibilité avec la matrice cimentaire.

La formulation des bétons a été réalisée selon la méthode de Dreux-Gorisse, puis les bétons obtenus ont été évalués à l'état frais et durci à l'aide des essais d'affaissement et de résistance à la compression.

Chapitre 3 Présentation et interprétation des résultats

3.1. Introduction

Cette partie s'articule sur la présentation des propriétés de différents matériaux utilisés pour la confection du béton et l'interprétation de résultats obtenus après essais au laboratoire, concernant l'influence de l'ajout des copeaux de bois non traités et traités par substitutions des graviers.

De par la méthode de substitution utilisée, nous proposerons le matériau le plus résistant en remplaçant un certain pourcentage de gravier par ajout des copeaux de bois suivant les taux de substitution de 0%,2%,5%,8%,11% et 14%.

3.2. Caractéristiques des constituants

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

3.2.1. Graviers

Le sable utilisé dans tous les mélanges de la présente étude est un sable roulé provenant de Idjwi et utilisé couramment dans la confection du béton dans notre région. Le tableau 3.2 représente les caractéristiques physiques du sable utilisé.

3.2.1.1. Analyse granulométrique

L'analyse granulométrique a été réalisée dans le but de déterminer la distribution pondérale des grains constituant les granulats en fonction de leurs dimensions. Cette répartition est représentée graphiquement sous forme de courbe granulométrique, permettant d'apprécier la proportion des différentes tailles des particules.

La figure 3.1 représente le courbe granulométrique des granulats utilisés dont les données ont été obtenues après tamisage des échantillons du sable roulé, des graviers de dimension : 4/8 ,8/15 et 15/25. L'axe des abscisses reprend les différents modules des tamis (mm) utilisés et celui des ordonnées les pourcentages cumulés des passants.

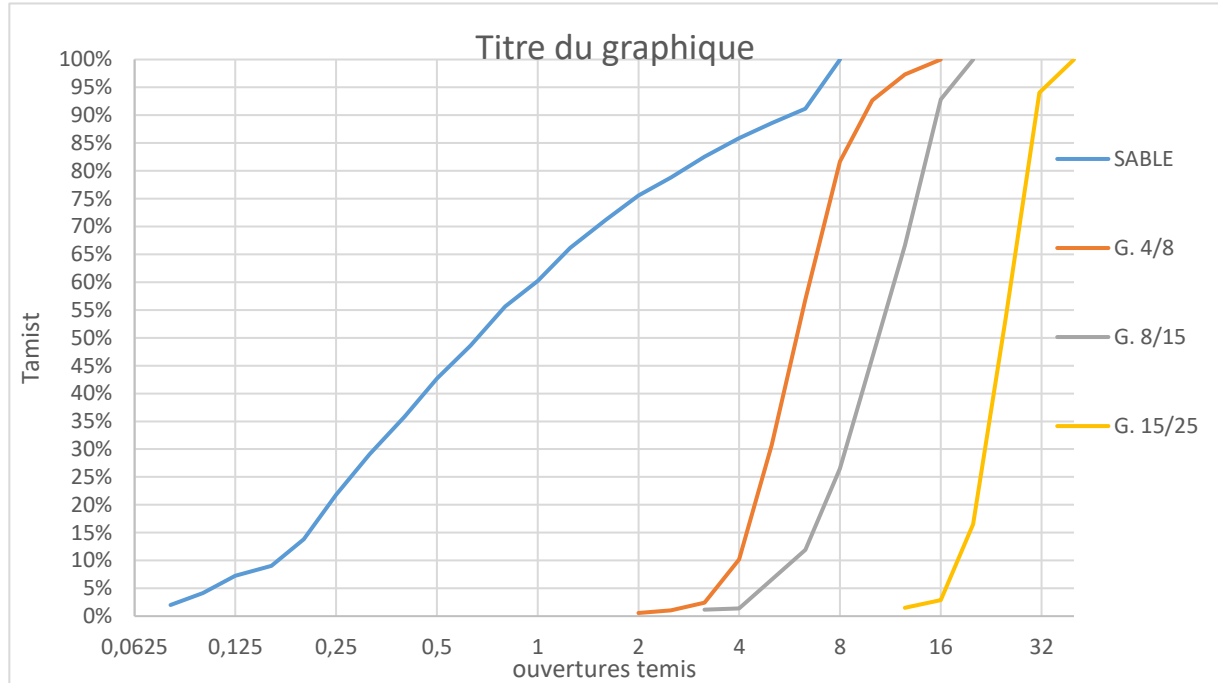


Figure 3.1 : Courbe granulométrique des granulats

La courbe granulométrique du sable, en bleu, présenté dans la figure 3.1 représente une granulométrie étalée, avec une bonne répartition des différentes tailles de grains. La partie inférieure de la courbe indique une présence limitée d'éléments très fins susceptibles d'augmenter la demande en eau, la partie supérieure de la courbe indique l'absence de particules grossières indésirable. La régularité de la courbe montre que le sable est bien gradué, ce qui favorise une bonne compacité du squelette granulaire, améliore l'ouvrabilité du mélange et contribue à l'obtention de meilleurs performances mécaniques du béton.

Le gravier 4/8,8/15,15/25, assurent respectivement, une fonction de liaison entre les différentes classes granulaires en limitant les vides inter granulaire, le rôle de la structuration du squelette, le rôle de conférer au béton sa rigidité et contribue significativement à sa résistance mécanique.

Dans le cadre d'un béton quaternaire, la combinaison de ces graviers favorise l'obtention d'un squelette granulaire compact et équilibré, réduisant la porosité et optimisant les performances mécaniques du matériau.

3.2.1.2. Module de finesse

La valeur du module de finesse obtenue, est de 2.7976, comprise entre 2.2 et 2.8. Ce résultat indique que le sable utilisé est un sable préférentiel pour la confection du béton.

3.2.1.3. Degré de propreté

Le degré de propreté de 91% montre une valeur supérieure à 80% ; le tableau 2.1 affirme qu'une valeur pareille indique une très faible teneur en particules argileuses et en fines nuisibles, traduisant la propreté du matériau.

3.2.1.4. Masse volumique de granulats

Le sable utilisé dans tous les mélanges de la présente étude est un sable roulé provenant de Idjwi et utilisé couramment dans la confection du béton dans notre région. Les graviers sont des concassé d'une granulométrie de 4/8 ,8/15,15/25, d'origine volcanique et produit à Goma. Les caractéristiques physiques de ces granulats sont représentées dans le tableau 3.1

Tableau 3.1 : Caractéristiques physiques des granulats

Désignation	Résultats				Unité
Granularité	Sable	4/8	8/15	15/25	Mm
Masse V. absolue	2.7037	2.526	2.3	2.62	g/cm ³
Masse V. apparente	1.55	1.2863	1.227	1.05	g/cm ³

Le tableau 2.2 nous permet de classer ces granulats parmi les granulats courants à cause de leurs masses comprises entre 2g/cm³ et 3g/cm³.

3.2.1.5. Taux d'absorption d'eau

Le taux d'absorption d'eau a été évalué sur les copeaux de bois, qui substituent les graviers. Les copeaux de bois utilisés sont le résultat des travaux de rabotages du bois. Le tableau 3.2 représente le résultat du taux d'absorption des copeaux de bois non traités

Tableau 3.2 :Taux d'absorption des copeaux de bois non traités

Composant	Taux d'absorption
Copeaux de bois traités	98%

Les copeaux de bois ayant une caractéristique de matériau hygroscopique, présentent un taux d'absorption très élevé. Afin de réduire ce taux d'absorption, les copeaux de bois ont été traités par une pâte cimentaire. Le tableau 3.3 représente le taux d'absorption des copeaux de bois après traitement évalué 14 jours après traitement.

Tableau 3.3 :Résultat du taux d'absorption des copeaux de bois traités

Composant	Taux d'absorption
Copeaux de bois traités	37%

Nous observons que le traitement des copeaux de bois par une pâte cimentaire réduit considérablement le taux d'absorption des copeaux de bois.

3.2.1.6. Essai de Los Angeles

L'essai Los Angeles est effectué pour mesurer les résistances combinées à la fragmentation par chocs et à l'usure. Le tableau 3.4 représente les valeurs du coefficient Los Angeles

Tableau 3.4 : Valeurs de coefficient du Los Angeles

Paramètre	Valeur
Graviers 4/8	20.01
Graviers 8/15	18.54
Graviers 15/25	15.98

Le tableau 2.3 nous permet de classer nos granulats dans la catégorie de granulat Bon à moyen.

3.2.2. Ciment

Le ciment utilisé est le ciment CIMERWA CEM II/B-P 42.5N produit au Rwanda. Le tableau 3.5 présente les caractéristiques du ciment.

Tableau 3.5 : Caractéristique du ciment utilisé

Caractéristiques	Résultats	Unités
Consistance normale	34	%
Masse spécifique	2.997	g/cm ³
Résistance à la compression	38	Mpa

La consistance normale du ciment est de 34%, ce qui signifie que la pâte de ciment nécessite 34% d'eau par rapport à la masse du ciment, pour atteindre une plasticité normale.

3.3. Résultat de la formulation

Dans cette section nous présentons les résultats de la formulation par la méthode des abaques de Dreux-Gorisse. Nous avons confectionné **66 éprouvettes différents**, avec 6 formulations différentes dont 6 éprouvettes de beton temoin , 30 incorporant les copeaux non traités et 30 avec les copeaux traités. Le tableau 3.6 représente les bétons que nous avons confectionnés ainsi que leur nombre.

Tableau 3.6 : Type et nombre d'éprouvettes confectionnés

Type de béton	Nombre
B.O	6
B.C.N.	30
B.C.T	30

3.3.1. Données de base

La tableau 3.7 présente les données de base qui ont servi pendant notre recherche.

Tableau 3.7 : Données de base du béton d'étude

Désignation	Valeurs
Résistance à 20 jours	20 Mpa
Classe vrai du ciment	38 Mpa
Consistance désirée	8 Cm
Type de vibration	Normal
Dmax	25 mm
Coefficient granulaire G	0.5

Ces données nous permettrons de trouver différentes valeurs après la formulation.

3.3.2. Dosage en liant et en eau

La Figure 2.12 et le rapport C/E obtenue à partir de la formule 2.8, nous ont permis de trouver le dosage en liant et en eau pour 1 m³ de béton. Le dosage en eau a été corrigé par le tableau 2.5. Les différents dosages obtenus sont représentés par le tableau 3.8

Tableau 3.8 : Dosage en eau et en ciment

Désignation	Valeurs
Rapport C/E	1.71
Dosage en ciment en kg/m ³	350
Dosage en eau en kg	204.62

Ce tableau représente le dosage en ciment et en eau pour un béton ordinaire qui ne contient pas de copeaux de bois.

3.3.3. Dosage en granulat

Le dosage en granulat a été déterminé à l'aide des proportions de sable et de gravier à partir de la courbe de référence OAB. Notre D_{max} étant >20 mm, les coordonnées du point A de la droite de référence ont été obtenues à partir de la formule 2.10 et 2.11. La figure 3.5 détermine les pourcentages en volumes absolus des granulats.

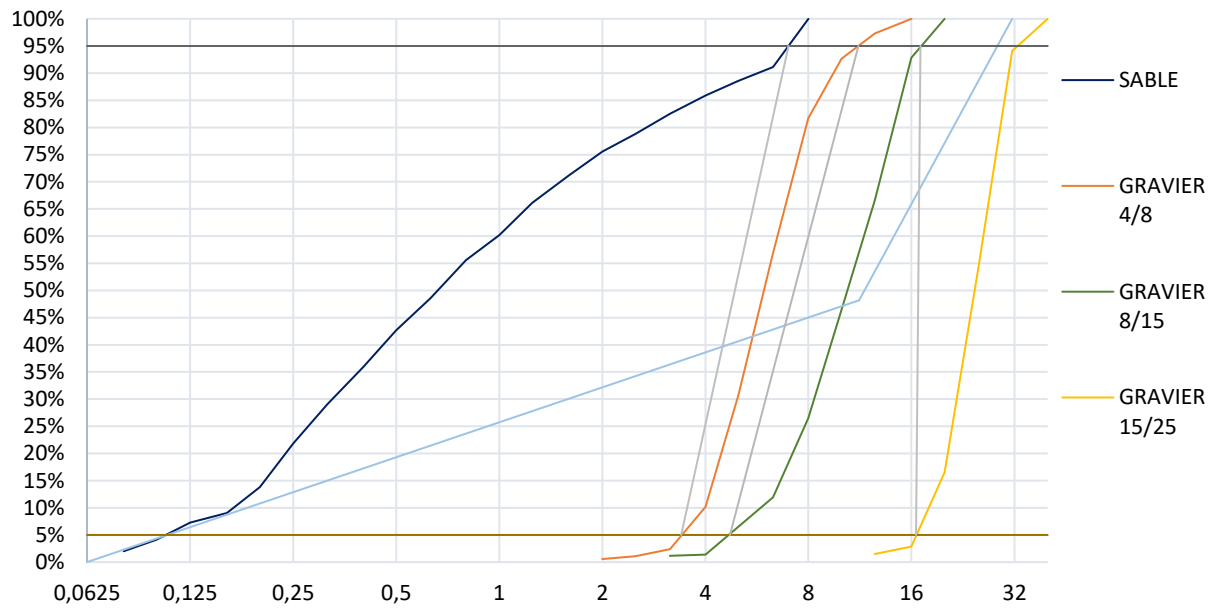


Figure 3.2 : Courbe de référence granulométrique

De cette courbe ressort les pourcentages des granulats qui sont respectivement, 39% de sable, 4% de gravier 4/8, 26 % de gravier 8/15, 31% de gravier 15/25.

Ces pourcentages sont fonction de 100 % de granulats. De ce fait, le volume total des granulats est de 0.69822 m^3 , obtenue par la formule 2.14 .Le tableau 3.9 reprend les dosages massiques des granulats pour 1 m^3 de béton.

Tableau 3.9 : Dosage massique des granulats pour 1 m^3 de béton

Désignation	Dosage massique en kg/m^3
Sable	755
Gravier 4/8	70.6
Gravier 8/15	401.5
Gravier 15/25	567

Ce tableau présente la composition du béton ordinaire avec les différents granulats, un dosage de ciment de 350kg/m^3 obtenue par le rapport C/E, supposé être adapter pour obtenir la résistance souhaiter de 20MPa. Le tableau 3.10 représente le dosage massique de granulats pour chaque substitution pour 1m^3 de béton.

Tableau 3.10 : Dosage des graviers par substitution pour 1m^3

COMPOSITION	Copeaux de bois Kg/m^3	Sable roulé Kg/m^3	Gravier 4/8 Kg/m^3	Gravier 8/15 Kg/m^3	Gravier 15/25 Kg/m^3
B.O	00	755	70.6	401.5	567
2% B.C	20,8	755	69,2	393,1	556
5% B.C	736	755	393,1	381	20,8
8% B.C	67,1	755	556	369	736
11% B.C	381	755	20,8	356,97	67,1
14% B.C	538,9	755	736	344,94	381

3.4. Caractérisation du béton

3.4.1. Consistance du béton

L'essai de consistance est évalué par l'affaissement du béton frais par son propre poids au cône d'Abrahms. Le tableau 3. 11 représente la quantité d'eau ajoutée pour obtenir l'affaissement cible de 8 cm selon les différentes proportions.

Tableau 3.11 : Affaissement des différents bétons

COMPOSITION	Affaissement	Eau ajoutée en litre
B.O	7.5	1.1
2% B.C.N	4.3	1.6
5% B.C.N	4.3	3.4
8% B.C.N	4.5	4.1
11% B.C.N	4.1	6.5
14 %B.C.N	4.5	6.9
2% B.C.T	6.2	1.3
5% B.C.T	6.1	2.6
8% B.C.T	6.3	3.4
11% B.C.T	6.1	5.3
14 %B.C.T	5.7	5.5

Les résultats montrent que la quantité d'eau à ajouter augmente proportionnellement au taux d'incorporation des copeaux de bois. Cette augmentation est nettement plus marquée dans le cas des copeaux non traités, en raison de leur forte capacité d'absorption d'eau. En revanche, le traitement appliqué aux copeaux de bois permet de réduire cette absorption, limitant ainsi la demande en eau et améliorant l'ouvrabilité du béton.

3.4.2. Masse volumique du béton à l'état durci

L'objectif de l'évaluation de la masse volumique est de vérifier le classement du béton dans la catégorie des bétons légers. La figure 3.3 représente la masse volumique du béton durci.

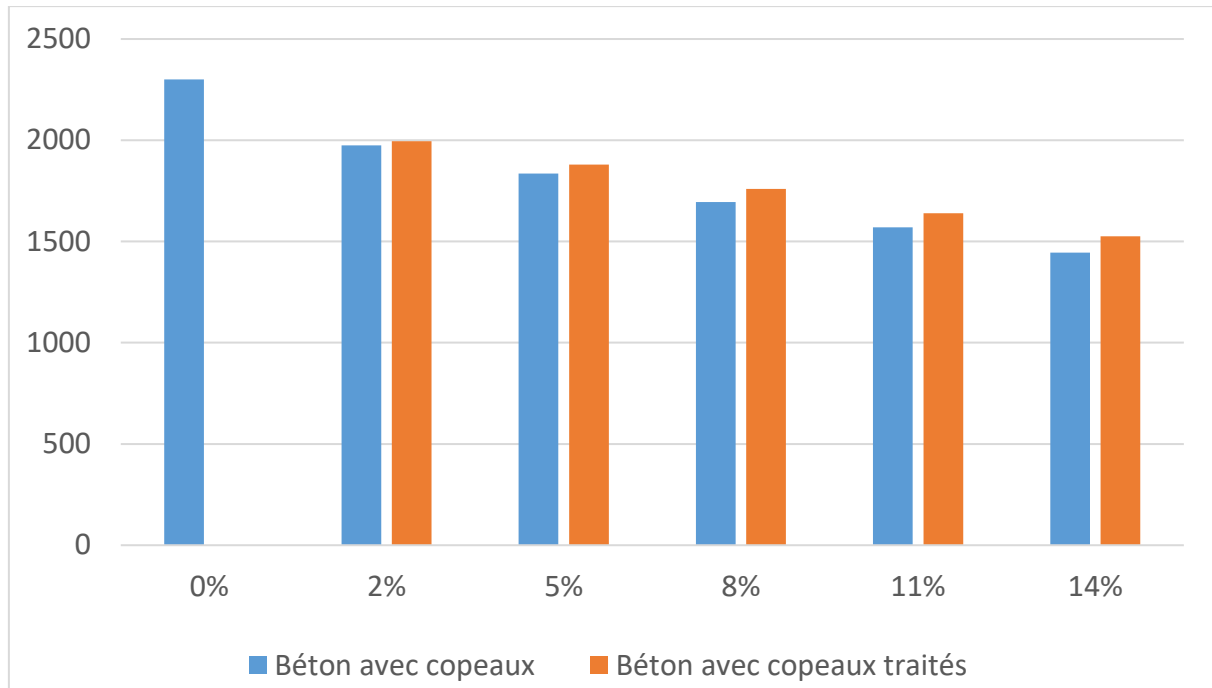


Figure 3.3 :masse volumique du béton

L'analyse des résultats montre une diminution progressive de la masse et de la masse volumique du béton avec l'augmentation du taux de substitution en copeaux de bois. Cette tendance s'explique par la faible densité du bois par rapport aux granulats minéraux, ce qui entraîne un allègement significatif du matériau.

On observe également que les bétons incorporant des copeaux traités présentent des masses volumiques légèrement supérieures à celles des copeaux non traités. Cela s'explique par l'effet du traitement, qui réduit la porosité et l'absorption d'eau des fibres, améliorant ainsi leur compacité au sein de la matrice cimentaire.

3.4.3. Résistance à la compression

Les résultats des essais de compression des éprouvettes cylindriques du béton à base de granulats naturels, à base des copeaux de bois non traités et des copeaux de bois traités, pour les différentes substitutions après 7 et 28 jours. Le figure 3.4 met en évidence l'influence du taux d'incorporation et du traitement des copeaux de bois sur la résistance à la compression du béton à 7 et 28 jours.

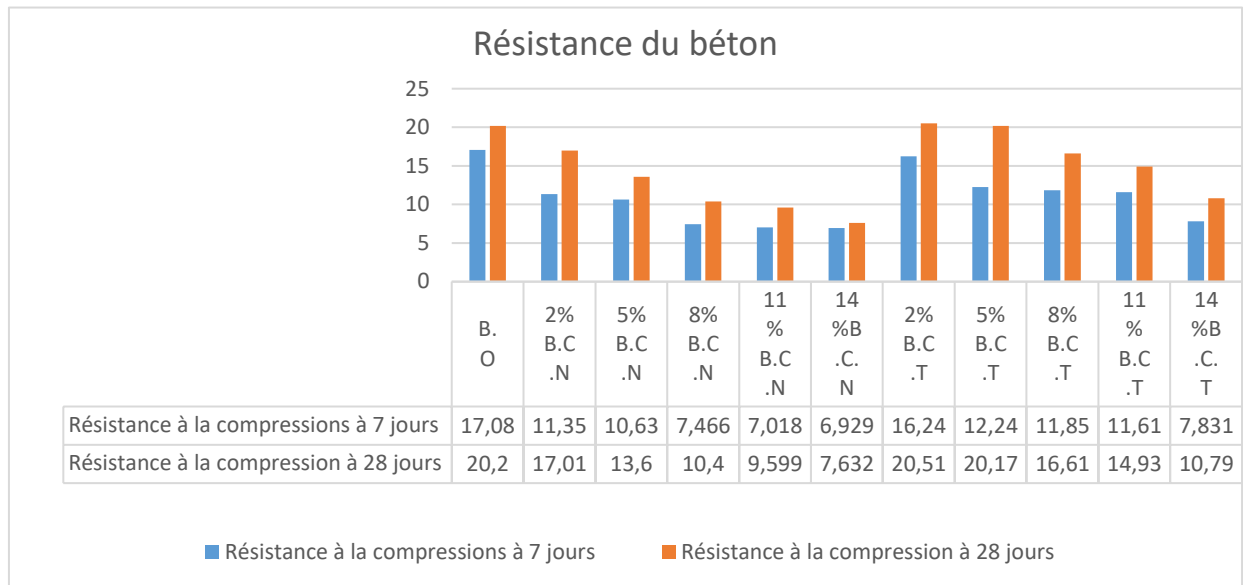


Figure 3.4 :Résistance du béton à 7 et 28 jours

Le béton témoin présente une résistance de 17,08 MPa à 7 jours et 20,20 MPa à 28 jours, confirmant l'augmentation normale liée à l'hydratation du ciment. L'ajout de copeaux non traités entraîne une diminution progressive et significative des résistances, due à l'absorption d'eau et à la faible adhérence bois-ciment. Cette perte devient critique au-delà de 8 %, atteignant environ 7,63 MPa à 28 jours pour 14 %.

En revanche, les copeaux traités améliorent nettement les performances mécaniques : à 2 % et 5 %, les résistances à 28 jours (20,5 MPa et 20,17 MPa) sont équivalentes ou légèrement supérieures à celles du béton ordinaire, traduisant une meilleure compatibilité bois-ciment. Au-delà de 8 %, une diminution progressive est observée, mais les valeurs restent supérieures à celles des bétons non traités. Ainsi, le traitement des copeaux permet d'optimiser les propriétés mécaniques, avec un dosage optimal situé entre 2 % et 5 %.

3.5. Conclusion partielle

Ce chapitre a été consacré à la présentation et à l'analyse des résultats obtenus lors des expérimentations en laboratoire. Il a permis de détailler les propriétés des matériaux utilisés, la formulation des différents bétons, ainsi que leurs caractéristiques à l'état frais et durci. L'étude a mis en évidence l'effet de la substitution partielle des graviers par des copeaux de bois, qu'ils soient traités ou non, sur la consistance, la densité et la résistance à la compression des bétons. Les résultats ont montré que l'ajout de copeaux traités jusqu'à 5 % permet de produire un béton léger tout en maintenant des performances mécaniques acceptables.

Conclusion générale

Cette étude avait pour objectif principal d'optimiser les caractéristiques mécaniques d'un béton intégrant les copeaux de bois, en substitution partielle des granulats, dans une perspective de valorisation des déchets de scierie et de réduction de l'impact environnemental des matériaux de construction. Elle s'inscrit dans une dynamique de recherche de solutions innovantes adaptées aux besoins croissants en infrastructures.

Afin d'améliorer leur compatibilité avec la matrice cimentaire, un traitement de minéralisation par enrobage cimentaire a été appliqué. Ce procédé s'est avéré déterminant, réduisant significativement l'absorption d'eau des fibres ligneuses, de 98 % à 37 %, et limitant ainsi les effets négatifs liés à l'interaction bois-ciment. La formulation des différents bétons a été réalisée en maintenant constants les paramètres essentiels, afin d'analyser objectivement l'influence des taux d'incorporation des copeaux.

Les essais effectués à l'état frais ont montré une diminution de l'ouvrabilité avec l'augmentation du pourcentage de copeaux, en raison de leur structure poreuse et de leur capacité d'absorption d'eau. Toutefois, cette perte de maniabilité demeure contrôlable par un ajustement approprié du dosage en eau. À l'état durci, l'ajout de copeaux a entraîné une réduction progressive de la masse volumique du béton, atteignant une valeur minimale de 1525 kg/m³, traduisant un allègement significatif du matériau.

Sur le plan mécanique, les résultats obtenus indiquent qu'un taux de substitution compris entre 2 % et 5 % permet de conserver une résistance à la compression satisfaisante, avoisinant 20 MPa, compatible avec certaines applications structurelles légères. Au-delà de ces proportions, une diminution plus marquée des résistances est observée, soulignant la nécessité d'optimiser le dosage pour maintenir un équilibre entre légèreté et performance mécanique.

En conclusion, l'incorporation maîtrisée de copeaux de bois, particulièrement pour des taux compris entre 2 % et 5 %, constitue une alternative pertinente pour la production de bétons légers à impact environnemental réduit. Toutefois, cette recherche, centrée principalement sur les propriétés mécaniques, ouvre des perspectives d'investigation relatives à la durabilité à long terme, l'absorption d'eau du béton durci ainsi qu'à la résistance biologique du matériau, en vue d'une application élargie dans le domaine de la construction durable.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Association, Global Cement and concrete, «Global concrete production,» 2023.
- [2] Ally Alinabiwe Nyamuhanga, «Impact of Gravel Origin on Concrete Properties: Economic and Environmental Implications,» *Internationel Journal of Modern Engineering Research*.
- [3] Ally Alinabiwe Nyamuhanga, «Recovery of Mining wastes in Buliding Materials,» *Open Journal of Civil Engeneering*, vol. 11, n° %104, pp. 379-397, 2021.
- [4] Mamery Serifou, Béton à base de recyclats:influence du type de recyclats et role de la formulation, bordeaux, 2013.
- [5] Haddouri Dhikra, Les bétons légers et très légers : formulation,caractérisation et applications, Guelma, 2024.
- [6] *NF EN 206+A2/CN:202*.
- [7] Bouchikhi-gerardin, Contribution à la formulation d'un béton v"gétal structural à base cimentaire incorporant des co-produits /déchets de bois, Lille, 2019.
- [8] B. JUDITH, confection d'un beton leger a base des copeaux de bois, Goma, 2018-2019.
- [9] Silouantonda Kouamissa, «Influence of wood chip on concrete characteristics,» *American journal of materials Science and Engineering*, vol. 11, 2023.
- [10] Bohumil Kasal, «Degradation mechanism of the wood-cell wall surface in a cement environment measured by atomic force microscopy,» *Journal of Materials in civil Engineering*, vol. 35, n° %17, 2023.
- [11] Huijuan Guo, «Properties of light cementitious composite materials with waste wood chips,» *Materials(MDPI)*, vol. 15, n° %123, 2022.
- [12] Walid Khelifi, «Effet des environnement de conservation en compression des composites bois-beton,» *Multidisciplinary Digital Publishing Institute*, vol. 15, n° %110, 2022.
- [13] Medini Maryem, Le Béton ordinaire, 2019/2020.

- [14] Prof. Debieb, Technologie du béton Programme + Chap1: Définition et constituants du béton, Médéa: Scribd.
- [15] Normalisation, NF EN 197-1 Ciments, 2001.
- [16] M. Fouad, science des matériaux de construction, université aboubekr belkaid, 2005-2006.
- [17] Belaid Ibtiham, Utilisation de déchets de poudre de verre comme un remplaçant partiel du ciment pour la préparation du béton et sable de dune sous un climat aride, 2017/2018.
- [18] Koul Lakhdar, Le comportement physico-mécanique du béton à base des granulats recyclés des déchets de démolition, Ghardaia, 2022/2023.
- [19] Muhiwa Grace, Cours de physique et technologie du béton, Goma, 2025.
- [20] Herihiri Ouided, Formulation et caractérisation des bétons légers, Biskra, 2010.
- [21] N. E. 2. :. 202.
- [22] Mohamed Achraf, Effet du rajout des fibres en polypropylène sur les caractéristiques mécaniques d'un béton cellulaire, Annaba, 2019.
- [23] Mohamed Achraf, Etude de l'influence de traitements de copeaux de bois sur les performances de béton de sable allégé, Laghouat, 2016.
- [24] Ayache Brahim, caractérisation des différents types de béton de copeaux de bois, Université BADJI MOKHTAR-ANNABA, 2019.
- [25] Muhiwa Grace, Cours de laboratoire des matériaux, GOMA, 2022-2023.
- [26] NF P 18 - 555, Granulats - Mesures des masses volumiques, de la porosité, du coefficient d'absorption et de la teneur en eau du sable, Paris: Editions Afnor, 1990.
- [27] G. Dreux, Nouveau Guide du béton, Paris : 3e édition, édition Eyrolles, 309p., 1981.
- [28] Ally Alinabiwe Nyamuhanga,, Cours de physique et technologie du béton/G3GC/ulppl Goma.
- [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.
- [30] NF P 18-451, Béton frais : Essais d'affaissement au cône, AFNOR, Paris, 1990.
- [31] F. Guillome, La technologie du béton, Paris, 2014.

- [32] NF P 18-459, Essai sur le béton durci : Essai de porosité et de masse volumique, AFNOR Paris, 2010.
- [33] Bouchikhi-Gerardin, Contribution to the formulation of a cement-based structural plant-based concrete incorporating wood co-products/waste, DOUAI: Université de Lille, 2019.
- [34] N. E. 1008, 2003.
- [35] Abdessamad Akkaoui, Bétons de granulats de bois:étude expérimentale et théoriques thermo-hydro-mécaniques par des approches multi-échelles, Paris, 2015.

ANNEXE

ANNEXE I. ANALYSE GRANULOMETRIQUE DU SABLE

SABLE				
Ouverture des tamis mm	Masse des refus en g	Masse refus cumulé	% refus cumulé	Tamisât
8	0	0	0	100%
6,3	270	270	8,86%	91%
5	78	348	11,42%	89%
4	83	431	14,15%	86%
3,15	101	532	17,47%	83%
2,5	113	645	21,18%	79%
2	99	744	24,43%	76%
1,6	133	877	28,79%	71%
1,25	155	1032	33,88%	66%
1	180	1212	39,79%	60%
0,8	140	1352	44,39%	56%
0,63	214	1566	51,41%	49%
0,5	180	1746	57,32%	43%
0,4	208	1954	64,15%	36%
0,315	206	2160	70,91%	29%
0,25	221	2381	78,17%	22%
0,2	245	2626	86,21%	14%
0,16	145	2771	90,97%	9%
0,125	54	2825	92,74%	7%
0,1	95	2920	95,86%	4%
0,08	65	2985	98,00%	2%

**OPTIMISATION DES CARACTERISTIQUES MECANQUES D'UN BETON LEGER DES
COPEAUX DE BOIS**

ANNEXE II. ANALYSE GRANULOMETRIQUE DE GRAVIER 4/8

GRAVIER 4/8				
Ouverture des tamis mm	Masse des refus en g	Masse refus cumulé	% refus cumulé	Tamisât
16	0	0	0	100%
12,5	81	81	3%	97,30%
10	140	221	7%	92,63%
8	328	549	18%	81,70%
6,3	744	1293	43%	56,90%
5	783	2076	69%	30,80%
4	619	2695	90%	10,17%
3,15	233	2928	98%	2,40%
2,5	40	2968	99%	1,07%
2	15	2983	99%	0,57%

ANNEXE III. ANALYSE GRABULOMETRIQUE DE GRAVIER 8/15

GRAVIER 8/15				
Ouverture des tamis mm	Masse des refus en g	Masse refus cumulé	% refus cumulé	Tamisât
20	0	0	0	100%
16	215	215	7,17%	92,83%
12,5	786	1001	33,37%	66,63%
10	606	1607	53,57%	46,43%
8	598	2205	73,50%	26,50%
6,3	437	2642	88,07%	11,93%
4	316	2958	98,60%	1,40%
3,15	7	2965	98,83%	1,17%

ANNEXE IV. ANALYSE GRANULOMETRIQUE DE GRAVIER 15/25

GRAVIER 15/25				
Ouverture des tamis mm	Masse des refus en g	Masse refus cumulé	% refus cumulé	Tamisât
40	0	0	0	100%
31,5	178	178	6%	94,07%
25	1213	1391	46%	53,63%
20	1113	2504	83%	16,53%
16	410	2914	97%	2,87%
12,5	41	2955	99%	1,50%

**OPTIMISATION DES CARACTERISTIQUES MECANIQUES D'UN BETON LEGER DES
COPEAUX DE BOIS**

ANNEXE VI. FORMULATION DU BETON

CARACTERISATION DU SABLE

Caractéristique	Résultats	Unités
Module de finesse	2.7976	-
Masse.v.absolue	2.7037	g/cm ³
Masse.v.apparente	1.55	g/cm ³

CARACTERISATION DES GRAVIERS

Caractéristique	Résultats		
Granularité	4-8	8-15	15-25
Masse.v.apparente	1.2863	1.227	1.05
Masse.v.absolue	2.526	2.3	2.62

1. Données

- $F_{c28}=20$ Mpa
- CIMENT CEM II 42.5, $\sigma_{C28}=38$ Mpa
- Affaissement=8cm
- D=25mm
- Granulats concassés

2. Détermination du Dosage C et E

$$F_{cm} = \sigma_{C28} \times G \times (C/E - 0.5)$$

$$F_{cm} = 1.15 \times f_{c28} = 1.15 \times 20 = 23 \text{ Mpa}$$

	Dimension maximale des granulats Dmax
--	--

**OPTIMISATION DES CARACTERISTIQUES MECANQUES D'UN BETON LEGER DES
COPEAUX DE BOIS**

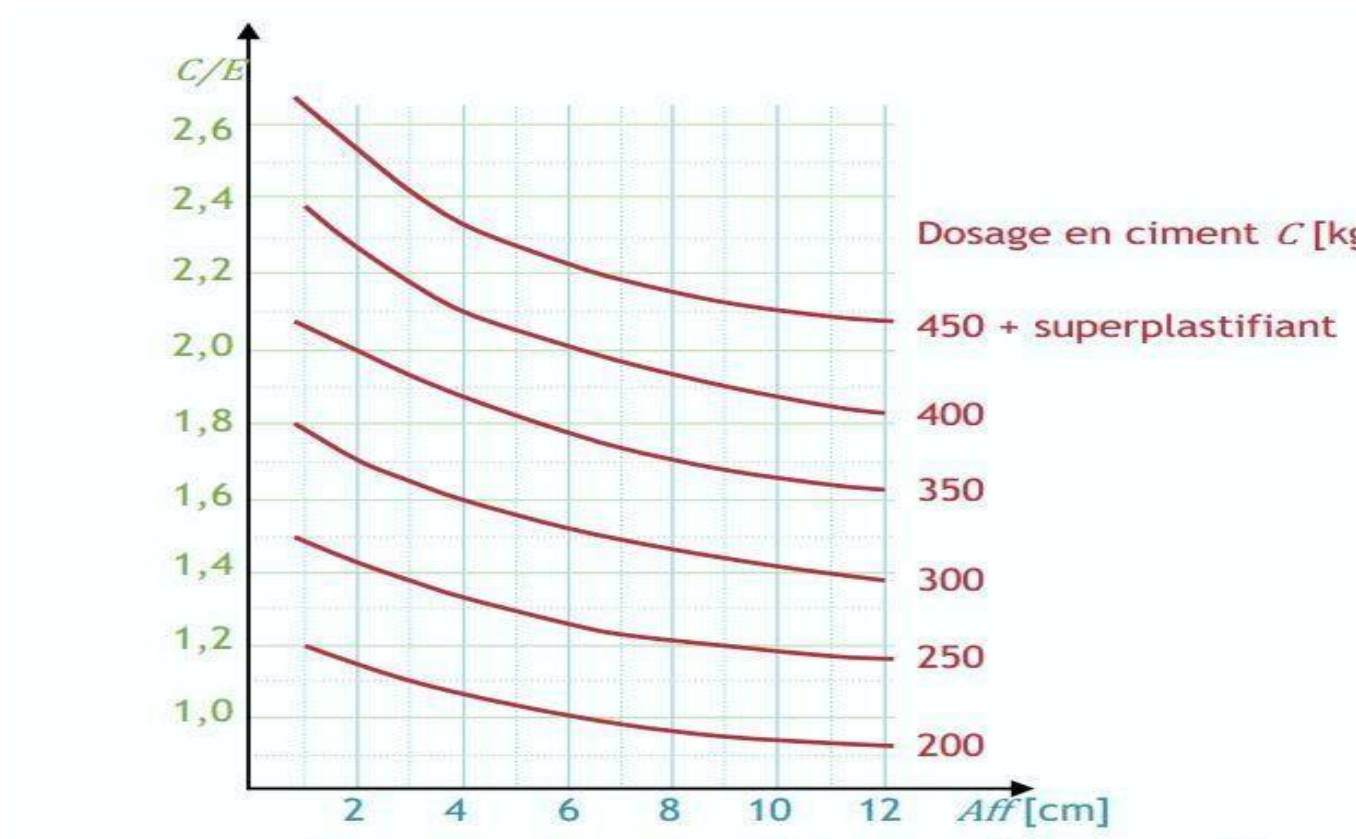
Qualités des granulats	Petits ($D \leq 12,5$ mm)	Moyens ($20 \leq D \leq 31,5$ mm)	Grossier ($D \geq 50$ mm)
Excellente	0,55	0,60	0,65
Bonne, courante	0,45	0,50	0,55
Passable	0,35	0,40	0,45

Sachant que les granulats sont passable et $D = 25\text{mm}$, $G = 0.5$

Alors, $\frac{C}{E} = \frac{23}{0.5 \times 38} + 0.5$

$\frac{C}{E} = 1.7105$

Avec $C/E = 1.7105$ et $A = 8$



On obtient $C = 350 \text{ Kg/m}^3$ et $E = 204.62$

OPTIMISATION DES CARACTERISTIQUES MECANQUES D'UN BETON LEGER DES COPEAUX DE BOIS

Comme $D_{max} = 25\text{mm}$, la correction sur l'eau est de 0

3. Traçage de la courbe granulaire de référence

- O est l'origine
- B est le point d'ordonnée 100% de la courbe granulométrique du plus gros granulat.
- Point A

$$\text{Module}(X) = [\text{Module}(D_{max}) + 38] / 2$$

$$\text{Mod}(X_A) = (\text{MOD}(25) + 38) / 2 = (45 + 38) / 2$$

$$\text{Mod}(X_A) = 41.5$$

$$X_A \text{ est entre } 10 \text{ et } 12.5, X_A = 11.25$$

$$Y = 50 - \sqrt{D_{max}} + K + K_s + K_p$$

Notre béton n'étant non pompable, $K_p = 0$

$$Y_A = 50 - \sqrt{(1.25 \times 25)} + K + K_s$$

Vibration		Faible		Normale		Puissante	
Forme des granulats (du sable particulier)		Roulé	Concassé	Roulé	Concassé	Roulé	Concassé
Dosage en Ciment	400 + Fluid	- 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

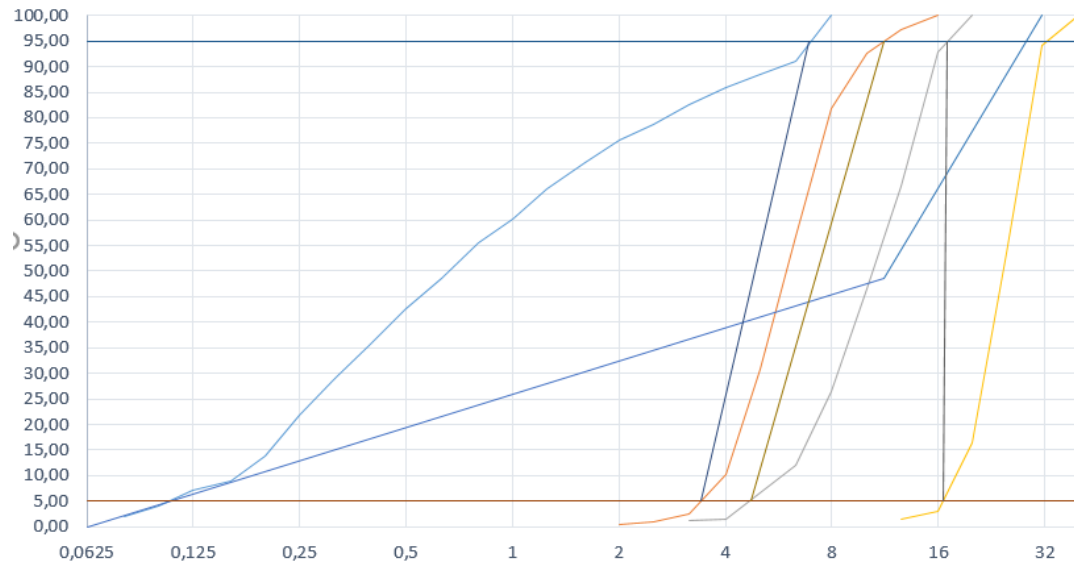
$$K_s = (6 M_f - 15) = (6 \times 2.7976) - 15 = 1.7856$$

K en fonction de la forme des granulats, du mode de vibration et du dosage en ciment ,

Les graviers sont des concassés ; $C=350$ et la vibration est normale : $K = +2$

$$\text{On a alors, } Y_A = 50 - \sqrt{(1.25 \times 25)} + 2 + 1.7856$$

$$Y_A = 48,19\%$$



On obtient :

% S=39, % G(4-8)=4 , %G(8-15)=26 , %G(15-25)=31

4. DOSAGE EN GRANULAT

$$V_{\text{Granulat}} = \gamma \times V_{\text{tot.béton}} - V_C$$

$$V_C = \frac{C}{\rho_C} = \frac{350}{2997} = 0,11678 = 116,78$$

Avec un diamètre étant de 25 , une consistance plastique , et un serrage normal ,le coefficient de compacité $\gamma = 0,825$

Comme les granulas sont des concassés , la correction sera de -0.01 , $\gamma = 0,825 - 0.01 = 0.815$

$$V_{\text{Granulats}} = 1000\sigma - V_c = 1000 \times 0,815 - 116,78 = 698.22 = 0.69822 \text{ m}^3$$

$$V_{\text{Sable}} = 0,4 \times 0.69822 = 0,279288 \text{ m}^3$$

$$V_{G1} = 0,04 \times 0.69822 = 0,0279288 \text{ m}^3$$

$$V_{G2} = 0,25 \times 0.69822 = 0,174555 \text{ m}^3$$

$$V_{G3} = 0,31 \times 0.69822 = 0,2164482 \text{ m}^3$$

DOSAGE MASSIQUE EN Kg

$$M_{\text{Sable}} = 0,279288 \times 2703,7 = 755,111\text{kg}$$

$$M_{G1} = 0,0279288 \times 2526 = 70,55\text{kg}$$

$$M_{G2} = 0,174555 \times 2300 = 401,48\text{kg}$$

$$M_{G3} = 0,2164482 \times 2620 = 567,1\text{kg}$$

Pour 1m^3 de béton on a :

$$C = 350 \text{ Kg/ m}^3$$

$$E = 204.62 \text{ Kg/m}^3 \text{ Kg/m}^3$$

$$S = 755\text{Kg}$$

$$G1 = 70.6\text{Kg}$$

$$G2 = 401.5 \text{ Kg}$$

$$G3 = 567 \text{ Kg}$$

SUBSTITUTION DES GRANULATS PAR LES COPEAUX DE BOIS

$$G1 = 70,6 \text{ Kg}$$

$$G2 = 401.5 \text{ Kg}$$

$$G3 = 567 \text{ Kg}$$

$$M_{\text{tot gravier}} = 1039.1 \text{ Kg/ m}^3$$

$$\% G(4-8) = 6.8, \% G(8-15) = 38.6, \% G(15-25) = 54.6$$

PREMIERE SUBSTITUTION : 2% Bois et 98% granulats

$$\% G(4-8) = 6.66, \% G(8-15) = 37.83, \% G(15-25) = 53.51, \% G \text{ bois} = 2$$

DOSAGE MASSIQUE EN Kg

$$M_{G1} = 6.66 \times 1039.1 = 69.2 \text{ kg}$$

$$M_{G2} = 37.83 \times 1039.1 = 393.1\text{kg}$$

$$M_{G3} = 53.51 \times 1039.1 = 556 \text{ kg}$$

$$M_B = 2 \times 1039.1 = 20.8 \text{ kg}$$

DEUXIEME SUBSTITUTION : 5% Bois et 95% granulats

% G(4-8)=6.46 , %G(8-15)=36.67, %G(15-25)=51.87 ,%G bois=5

DOSAGE MASSIQUE EN Kg

$$M_{G1}=6.46 \times 1039.1 = 67.1 \text{ kg}$$

$$M_{G2}=36.67 \times 1039.1 = 381$$

$$M_{G3}=51.87 \times 1039.1 = 538.9 \text{ kg}$$

$$M_B=5 \times 1039.1 = 52 \text{ kg}$$

TROISIEME SUBSTITUTION : 8% Bois et 92% granulats

G (4-8) = 6.256, %G (8-15) =34.354, %G (15-25) =50.232, %G bois=8

DOSAGE MASSIQUE EN Kg

$$M_{G1}=6.256 \times 1039.1 = 65 \text{ kg}$$

$$M_{G2}=35.512 \times 1039.1 = 369$$

$$M_{G3}=50.232 \times 1039.1 = 522 \text{ kg}$$

$$M_B=8 \times 1039.1 = 83.1 \text{ kg}$$

QUATRIEME SUBSTITUTION : 11% Bois et 89% granulats

% G (4-8) =6.052, %G (8-15) =34.354, %G (15-25) =48.594, %G bois=11

DOSAGE MASSIQUE EN Kg

$$M_{G1}=6.043 \times 1039.1 = 62.8 \text{ kg}$$

$$M_{G2}=34.354 \times 1039.1 = 356.97$$

$$M_{G3}=48.594 \times 1039.1 = 504.9 \text{ kg}$$

$$M_B=11 \times 1039.1 = 114.3 \text{ kg}$$

CINQUIEME SUBSTITUTION : 14% Bois et 86% granulats

% G (4-8) =5.848, %G (8-15) =33.196 %G (15-25) =46.956, %G bois=14

DOSAGE MASSIQUE EN Kg

$$M_{G1}=5.848 \times 1039.1 = 60.76 \text{ kg}$$

$$M_{G2}=33.196 \times 1039.1 = 344.94 \text{ Kg}$$

**OPTIMISATION DES CARACTERISTIQUES MECANQUES D'UN BETON LEGER DES
COPEAUX DE BOIS**

$$M_{G3}=46.956 \times 1039.1 =487.9 \text{ kg}$$

$$M_B=14 \times 1039.1 =145.5 \text{ kg}$$

ANNEXE V. DOSAGE SELON DIFFERENTS CONSTITUANT

TYPE BETON	COMPOSANT	1M CUBE	0,00643072 m ³	Coef. S. 1.2	6 épr.
B.O	S	755	4,8551936	5,82623232	34,9573939
	G1	70,6	0,45400883	0,5448106	3,26886359
	G2	401,5	2,58193408	3,0983209	18,5899254
	G3	567	3,64621824	4,37546189	26,2527713
2% B.C	S	755	4,8551936	5,82623232	34,9573939
	G1	69,2	0,44500582	0,53400699	3,20404193
	G2	393,1	2,52791603	3,03349924	18,2009954
	G3	556	3,57548032	4,29057638	25,7434583
	B	20,8	0,13375898	0,16051077	0,96306463
5% B.C	S	755	4,8551936	5,82623232	34,9573939
	G1	67,1	0,43150131	0,51780157	3,10680945
	G2	381	2,45010432	2,94012518	17,6407511
	G3	538,9	3,46551501	4,15861801	24,9517081
	B	52	0,33439744	0,40127693	2,40766157
8% B.C	S	755	4,8551936	5,82623232	34,9573939
	G1	65	0,4179968	0,50159616	3,00957696
	G2	369	2,37293568	2,84752282	17,0851369
	G3	522	3,35683584	4,02820301	24,169218
	B	83,1	0,53439283	0,6412714	3,84762839
11% B.C	S	755	4,8551936	5,82623232	34,9573939
	G1	62,8	0,40384922	0,48461906	2,90771436
	G2	356,97	2,29557412	2,75468894	16,5281337
	G3	504,9	3,24687053	3,89624463	23,3774678

OPTIMISATION DES CARACTERISTIQUES MECANQUES D'UN BETON LEGER DES
COPEAUX DE BOIS

	B	114,3	0,7350313	0,88203756	5,29222533
14% B.C	S	755	4,8551936	5,82623232	34,9573939
	G1	60,76	0,39073055	0,46887666	2,81325994
	G2	344,94	2,21821256	2,66185507	15,9711304
	G3	487,9	3,13754829	3,76505795	22,5903477
	B	145,5	0,93566976	1,12280371	6,73682227