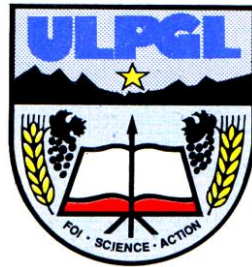


UNIVERSITE LIBRE DES PAYS DES GRANDS LACS

FACULTE DE SCIENCES ET TECHNOLOGIES

DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL



BP. 368 GOMA

www.ulpgl.net

**EVALUATION DES PROPRIETES PHYSICO-
MECANIQUES DES CEMENTS UTILISES A
GOMA : Cas du ciment HIMA Cement et
CIMERWA**

Par **AGANO SHANGOKO Elisha**

Travail présenté en vue de l'obtention du Diplôme de
Bachelor en Sciences de Génie civil

Option : Génie civil

Directeur : CT. MASIKA MUHIWA Grace

Encadreur : Ir. Pascal KOKO KATUMBI

ANNEE ACADEMIQUE 2024 – 2025

Epigraphe

« La qualité ne se suppose pas, elle se mesure. »

Dr. King DAVID ROFFINO

Dédicace

A mes très chers parents KARARO SHANGOKO Roger et FURAHA HANGI Justine.

AGANO SHANGOKO Elisha

Remerciements

Au terme de ce travail, nous exprimons notre réelle gratitude à notre Père, Dieu créateur source de vie, de courage et de notre persévérance, qui nous a permis d'achever cette étude.

Nos sincères remerciements vont à l'université libre des pays des grands lacs(ULPGL) et plus particulièrement aux autorités de la faculté des sciences et technologies appliquées pour leur encadrement et leur suivi tout au long de notre parcours.

Nous tenons à remercier chaleureusement notre directrice, Mme CT. MASIKA MUHIWA Grâce, ainsi que notre encadreur Ir. KOKO KATUMBI Pascal, pour leur disponibilité, leurs conseils et leur encadrement rigoureux qui ont grandement contribué à la réalisation de ce mémoire.

Nos remerciements vont également à nos parents, KARARO SHANGOKO Roger et FURAHANGI Justine, pour leurs sacrifices inestimables, leur amour inconditionnel et leur soutien permanent tout au long de notre formation.

Nous n'avons pas aussi oublié les multiples efforts des nos frères et sœurs dont nous sommes reconnaissant, notamment Elie, Héritier, Santu, Dido, Cardozo, Nadine, Mavinga et bien d'autres, pour leur appui moral, financier et leurs encouragements.

A nos amis et camarades Shadrack, Carlos, Christelle, Laetitia, Cédric, Augustin, Naomie et ainsi qu'à nos collègues de promotion, nous partageons nos sincères remerciement pour les moments partagés, l'entraide et l'ambiance fraternelle qui ont enrichi notre parcours.

Enfin, à toutes celles et ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce travail, nous adressons nos remerciements les plus sincères.

AGANO SHANGOKO Elisha

Résumé

Ce travail porte sur une étude comparative des propriétés physico-mécaniques des ciments couramment utilisés dans la ville de Goma : HIMA Cement et CIMERWA, ce qui a permis de mettre en évidence des différences notables tant au niveau physique que mécanique. En ce qui concerne les propriétés physiques, la consistance normale du ciment HIMA est obtenue avec une teneur en eau de 32,2%, tandis que le ciment CIMERWA nécessite une teneur légèrement supérieure de 34%, traduisant une demande en eau plus importante. Toutefois, les deux ciments présentent une pénétration conforme de 5 mm selon l'essai de Vicat. En ce qui concerne les temps de prise, le ciment HIMA se caractérise par un début de prise plus précoce (196 minutes) comparativement au ciment CIMERWA (260 minutes), alors que sa fin de prise est plus tardive de 456 minutes contre 382 minutes pour le ciment CIMERWA. Par ailleurs, la masse volumique absolue du ciment CIMERWA de $3,1 \text{ g/cm}^3$ est légèrement supérieure à celle du ciment HIMA de $2,91 \text{ g/cm}^3$, ce qui traduit une compacité plus élevée de ce matériau. Du point de vue des propriétés mécaniques, les résultats obtenus montrent que le ciment CIMERWA présente une résistance à la flexion légèrement supérieure à jeune âge, avec une valeur de $4,52 \text{ N/mm}^2$ à 7 jours contre $4,23 \text{ N/mm}^2$ pour le ciment HIMA. Cependant, à long terme, cette tendance se maintient, le ciment CIMERWA atteignant $8,76 \text{ N/mm}^2$ à 28 jours contre $8,42 \text{ N/mm}^2$ pour le ciment HIMA. En ce qui concerne la résistance à la compression, le ciment CIMERWA présente également des performances globalement supérieures, avec des valeurs de 11,25 MPa à 7 jours et 20,798 MPa à 28 jours, comparativement à 9,387 MPa et 19,245 MPa respectivement pour le ciment HIMA. En définitive, les résultats montrent que le ciment CIMERWA présente des performances mécaniques légèrement supérieures à celles du ciment HIMA, aussi bien à jeune âge qu'à long terme. Toutefois, les écarts observés entre les deux ciments restent relativement faibles, ce qui indique que leurs performances sont globalement comparables dans les conditions de l'étude. Ainsi, le choix du ciment devrait être orienté en fonction des exigences spécifiques du projet, notamment les conditions d'utilisation, la disponibilité des matériaux et surtout les performances recherchées à court ou à long terme.

Mots-clés : propriétés, physico-mécaniques, ciment.

Abstract a adapter

This work focuses on a comparative study of the physico-mechanical properties of cements commonly used in the city of Goma: HIMA Cement and CIMERWA, which made it possible to highlight notable differences both in physical and mechanical terms. Regarding physical properties, the normal consistency of HIMA cement is achieved with a water content of 32.2%, whereas CIMERWA cement requires a slightly higher content of 34%, indicating a greater water demand. However, both cements exhibit a compliant penetration of 5 mm according to the Vicat test. Concerning setting times, HIMA cement is characterized by an earlier initial setting time (196 minutes) compared to CIMERWA cement (260 minutes), while its final setting time is later, at 456 minutes versus 382 minutes for CIMERWA cement. Furthermore, the absolute density of CIMERWA cement (3.1 g/cm^3) is slightly higher than that of HIMA cement (2.91 g/cm^3), indicating a higher compactness of this material. From a mechanical standpoint, the results obtained show that CIMERWA cement exhibits slightly higher flexural strength at an early age, with a value of $4,52 \text{ N/mm}^2$ at 7 days compared to $4,23 \text{ N/mm}^2$ for HIMA cement. In the long term, this trend is maintained, with CIMERWA cement reaching $8,76 \text{ N/mm}^2$ at 28 days, compared to $8,42 \text{ N/mm}^2$ for HIMA Cement. Regarding compressive strength, CIMERWA cement also shows overall superior performance, with values of 11.25 MPa at 7 days and 20.798 MPa at 28 days, compared to 9.387 MPa and 19.245 MPa respectively for HIMA cement. Ultimately, the results show that CIMERWA cement exhibits slightly superior mechanical performance compared to HIMA cement, both at early age and in the long term. However, the differences observed between the two cements remain relatively small, indicating that their performances are overall comparable under the conditions of this study. Therefore, the choice of cement should be guided by the specific requirements of the project, including conditions of use, material availability, and mostly the desired performance in the short or long term.

Keywords: properties, physico-mechanical, cement.

Sommaire

Epigraphe.....	i
Dédicace	ii
Remerciements	iii
Résumé	iv
Sommaire.....	vi
Liste des abréviations	x
Liste des tableaux	xii
Liste des figures.....	xiii
INTRODUCTION GENERALE.....	1
1. CONTEXTE.....	1
2. PROBLEMATIQUE	2
3. HYPOTHESE.....	2
4. INTERET DU SUJET	3
5. OBJECTIFS	3
6. METHODOLOGIE ET DELIMITATION DU TRAVAIL	3
7. SUBDIVISION	4
Chapitre 1 GENERALITES	5
1.1 INTRODUCTION	5
1.2 GENERALITES SUR LE CIMENT	5
1.2.1 Introduction	5
1.2.2 Historique	5
1.2.3 Constituants du ciment	6
1.2.4 Types de Ciments courants	8

1.2.5	Classe de Résistance	9
1.2.6	Caractéristique du ciment courant.....	10
1.2.7	Domaine d’emplois des ciments	15
1.3	GENERALITES SUR LES MORTIERS	17
1.3.1	Introduction	17
1.3.2	Composition du mortier	17
1.3.3	Types des mortiers selon les liants utilisés	19
1.3.4	Types des mortiers selon l’usage	19
1.3.5	Types des mortiers en fonction du dosage du liant	20
1.4	GENERALITES SUR LE BETON	22
1.4.1	Introduction	22
1.4.2	Composition du béton	23
1.4.3	Typologie des bétons.....	23
1.4.4	Utilisation du béton dans le bâtiment	24
1.4.5	Utilisation des bétons dans le travaux publics	24
1.5	CONCLUSION PARTIELLE	25
Chapitre 2 MATERIAUX ET METHODOLOGIE DU TRAVAIL.....		26
2.1	INTRODUCTION	26
2.2	NATURE ET ORIGINE DES MATERIAUX	26
2.2.1	Sable	26
2.2.2	Eau de gâchage.....	27
2.2.3	Ciment	27
2.3	CARACTERISATION DES MATERIAUX	27
2.3.1	Essais sur le sable	28
2.3.2	Essais sur le ciment	34
2.4	FORMULATION DU MORTIER NORMAL	37
2.4.1	Choix et justification de la méthode.....	37
2.4.2	Criblage du sable	38
2.4.3	Présentation de la méthode	39
2.5	PROGRAMME EXPERIMENTAL.....	42
2.6	CONCLUSION PARTIELLE	43

Chapitre 3 PRESENTATION ET INTERPRETATION DES RESULTATS... 44

3.1 INTRODUCTION.....	44
3.2 CARACTERISTIQUES DU SABLE	44
3.2.1 Analyse granulométrique	44
3.2.2 Masse volumique du sable	46
3.2.3 Essai équivalent de sable.....	47
3.3 PROPRIETES PHYSIQUES DE CIMENTS	47
3.3.1 Essai de consistance	47
3.3.2 Essai de prise	49
3.3.3 Masse volumique du ciment.....	50
3.4 RESULTAT DE LA FORMULATION DU MORTIER.....	51
• Données	51
3.5 PROPRIETES MECANIQUES DE CIMENTS	51
3.5.1 Caractéristiques des mortiers	51
3.5.2 Résistance à la flexion.....	51
3.5.3 Résistance à la compression	53
3.6 CONCLUSION PARTIELLE	54
CONCLUSION GENERALE	56
Bibliographie	58
ANNEXE 1 : ESSAIS SUR LE SABLE.....	60
1. Composition granulométrique du sable.....	60
2. Équivalent de sable.....	61
3. Masse volumique apparente du sable.....	61
4. Masse volumique absolue du sable	62
ANNEXE 2 : ESSAIS SUR LE CIMENT	63
1. Valeurs des consistances du ciment HIMA Cement et CIMERWA.....	63
2. Valeurs du début et fin de prise du ciment HIMA Cement et CIMERWA	63
3. Valeurs des masses volumiques des ciments	64
4. Valeurs des résistances à la flexion(N/mm^2) à 7 et 28jours.....	64

5. Valeurs des résistances à la compression(Mpa) à 7 et 28jours	64
---	----

Liste des abréviations

AG : Analyse granulométrique

C : Dosage en ciment

Cc : coefficient de courbure

Cu : coefficient d'uniformité

E : Dosage en eau

E/C: Rapport Eau-Ciment

EN : Norme Européenne

ES : Équivalent de sable

F_c : Charge maximale à la rupture en newtons

F_f : force maximale de flexion

g : grammes

kg : Kilogrammes

m : Mètre

MF : module de finesse

mm : Millimètres

MPa : Méga pascal

NF : Norme française

R_c : résistance à la compression

R_f : résistance à la flexion

ρ : masse volumique

Liste des tableaux

<i>Tableau 1-1: Classes des résistances</i>	10
<i>Tableau 1-2: Caractéristiques mécaniques des ciments courants (FESTA & DREUX, 1998)</i> .	14
<i>Tableau 1-3: Valeurs des résistances garanties des ciments courants (FESTA & DREUX,1998)</i>	15
<i>Tableau 2-1 : Tableau du criblage</i>	38
<i>Tableau 2-2 : programme expérimental</i>	43
<i>Tableau 3-1 : module de finesse</i>	45
<i>Tableau 3-2 : coefficient de courbure et coefficient d'uniformité</i>	46
<i>Tableau 3-3 : masse volumique du sable</i>	46
<i>Tableau 3-4 : équivalent de sable</i>	47
<i>Tableau 3-5 : valeurs des consistances du ciment HIMA CEMENT et CIMERWA</i>	48
<i>Tableau 3-6 : valeurs des masses volumiques des ciments</i>	50

Liste des figures

<i>Figure 1-1 : Composition du mortier</i>	18
<i>Figure 1-2 :dosage du mortier pour un sac de ciment</i>	22
<i>Figure 1-3 :Volume des vides et des solides dans le béton</i>	23
<i>Figure 2-1 : Sable de rivière</i>	26
<i>Figure 2-2 : Ciment HIMA</i>	27
<i>Figure 2-3 : Ciment CIMERWA</i>	27
<i>Figure 2-4 : Moules prismatiques</i>	40
<i>Figure 2-5 : Eprouvette prismatique soumise à une force appliquée au milieu</i>	41
<i>Figure 2-6:primes soumise à la compression</i>	42
<i>Figure 3-1: Courbe granulométrique</i>	45
<i>Figure 3-2 : Graphique de la consistance</i>	48
<i>Figure 3-3 : Graphique de temps de prises du ciment HIMA CEMENT et CIMERWA</i>	49
<i>Figure 3-4 : graphique de la résistance à la flexion</i>	52
<i>Figure 3-5 : graphique de la résistance à la compression</i>	53

INTRODUCTION GENERALE

1. CONTEXTE

Le Ciment constitue l'un des matériaux de base les plus utilisés dans le secteur de la construction, en raison de son rôle essentiel dans la fabrication du béton et des mortiers. La qualité du ciment influence directement les performances mécaniques, la durabilité et la sécurité des ouvrages de génie civil [1]. Dans les pays en développement, et particulièrement en République Démocratique du Congo, le marché du ciment connaît une croissance importante liée à l'urbanisation rapide et à l'augmentation des besoins en infrastructures.

Dans la ville de Goma, située dans la région des Grands Lacs, plusieurs marques de ciment sont disponibles sur le marché, parmi lesquelles HIMA Cement et CIMERWA, largement utilisées dans les travaux de construction. Cependant, malgré leur forte consommation, il existe peu d'études locales documentées portant sur l'évaluation systématique de leurs propriétés physico-mécaniques. Cette situation peut engendrer une incertitude quant à la conformité de ces ciments aux normes en vigueur et à leur aptitude à garantir des performances satisfaisantes dans les conditions climatiques et géologiques spécifiques de la région.

Or, les propriétés physico-mécaniques telles que la consistance, le temps de prise, masse volumique absolue, la résistance à la flexion et la résistance à la compression constituent des paramètres fondamentaux pour caractériser la qualité d'un ciment [2]. Leur évaluation permet non seulement de vérifier la conformité aux normes internationales, mais aussi d'orienter les ingénieurs et techniciens dans le choix des matériaux, et les adaptés aux besoins des projets de construction.

C'est dans ce contexte que s'inscrit le présent travail, qui vise à évaluer et comparer les propriétés physico-mécaniques des ciments HIMA Cement et CIMERWA utilisés à Goma, afin

de fournir des données scientifiques fiables pouvant contribuer à l'amélioration de la qualité des constructions et à la sécurité des ouvrages dans la région.

2. PROBLEMATIQUE

Le développement rapide du secteur de la construction dans la ville de Goma entraîne une utilisation croissante de différentes marques de ciment dans la réalisation des ouvrages de génie civil. Parmi celles-ci, les ciments HIMA et le ciment CIMERWA figurent parmi les plus utilisés sur le marché local. Cependant, malgré leur large diffusion, il existe un manque d'informations scientifiques locales sur leurs propriétés physico-mécaniques réelles et sur leur conformité aux normes en vigueur. Cette absence de données expérimentales locales peut conduire à des choix de matériaux basés principalement sur des considérations économiques ou de disponibilité, sans garantie suffisante de performance et de durabilité des ouvrages. Or, des insuffisances au niveau des propriétés physiques et mécaniques du ciment peuvent affecter la résistance du béton ou du mortier, sa stabilité et, à long terme, la sécurité des constructions. Dès lors, deux questions se posent, premièrement, comment se caractérisent les propriétés physico-mécaniques, notamment la résistance mécanique (résistance à la flexion et à la compression), la consistance normale, les temps des prises et la masse volumique absolue de ces ciments ? Deuxièmement, existe-il une différence significative entre les performances physico-mécaniques du ciment HIMA et celles du ciment CIMERWA utilisé à Goma ?

3. HYPOTHESE

A partir de ces interrogations, l'hypothèse anticipative est que les ciments HIMA et CIMERWA présenteraient des propriétés physico-mécaniques conformes aux normes en vigueur, notamment en terme de résistance à la flexion, de la résistance à la compression, de temps de prise, de consistance et de la masse volumique absolue. Par ailleurs, il existerait une différence significative entre les propriétés physico-mécaniques du ciment HIMA et celles du ciment CIMERWA. L'un des deux ciments présenteraient de meilleures performances mécaniques, le rendant plus approprié pour les ouvrages nécessitant une résistance élevée.

4. INTERET DU SUJET

Ce sujet revêt un intérêt majeur tant sur le plan scientifique que pratique, sur le plan technique, elle permet de déterminer les performances réelles des ciments les plus utilisés localement, afin de garantir des constructions sûres, durables et adaptées au contexte géologique et climatique particulier de Goma, Et sur le plan scientifique, elle contribue à combler le vide de données locales fiables sur les qualités des matériaux de construction, ce qui peut enrichir les références techniques pour les chercheurs, laboratoires et institutions.

5. OBJECTIFS

L'objectif général de cette étude est d'évaluer et comparer les propriétés physico-mécaniques des ciments HIMA et CIMERWA utilisés à Goma afin de déterminer leur aptitude à répondre aux exigences des constructions locales. Et comme objectifs spécifiques sont pour identifier et caractériser les sables pour la confection des éprouvettes du mortier normal, Comparer les performances de ces deux ciments en terme de résistance et en suite identifier le ciment le plus adapté au contexte géotechnique et climatique.

6. METHODOLOGIE ET DELIMITATION DU TRAVAIL

Pour mener à bien cette étude, la recherche s'est appuyée dans un premier temps sur une méthode documentaire pour recueillir les ouvrages et documents nécessaires à ce travail. En suite une méthode expérimentale pour guider nos travaux de laboratoire tout au long de l'exécution de notre étude. Afin les méthodes statistiques pour évaluer les résultats obtenus et orienter nos préférences et conclusions

Vue le temps moyen que nous disposons, ce travail portera uniquement sur les caractéristiques mesurables en laboratoire telles que la masse volumique absolue, la consistance normale, le temps de prise et surtout la résistance à la flexion et à la compression du mortier aux âges de 7 et 28 jours. En ce qui concerne l'analyse chimique, environnemental et économique, nous laisserons aux chercheurs à l'idée d'enrichir ce travail.

7. SUBDIVISION

Hormis l'introduction et la conclusion générales, ce travail s'articule autour de trois chapitres principaux. Le premier chapitre aborde les généralités sur le ciment, les généralités sur les mortiers et sur les bétons, les domaines d'utilisation. Le deuxième chapitre traite de la méthodologie mise en œuvre, incluant la caractérisation des matériaux, la formulation du mortier, les essais réalisés sur le mortier, ainsi que la mise en place du programme expérimental. Enfin, le troisième chapitre est consacré à la présentation et l'interprétation des résultats obtenus.

Chapitre 1 GENERALITES

1.1 INTRODUCTION

Le présent chapitre vise à fournir un aperçu général des matériaux afin de contextualiser l'étude sur les ciments. Il s'articule en trois sections principales. La première section présente les généralités sur le ciment, en abordant avec son historique, ses constituants, ses types et ses caractéristiques. La deuxième section traite des mortiers, en expliquant leur rôle, leur composition... Enfin, la troisième section s'intéresse au béton.

1.2 GENERALITES SUR LE CIMENT

1.2.1 Introduction

Le ciment est un liant hydraulique qui se présente sous la forme d'une poudre minérale fine s'hydratant en présence de l'eau. Il forme une pâte faisant prise qui durcit progressivement à l'air ou dans l'eau. C'est le constituant fondamental du béton puisqu'il permet la transformation d'un mélange sans cohésion en un corps solide. [3] Ce point ci-dessous va nous amener comprendre les origines de fabrication des ciments.

1.2.2 Historique

Les romains furent sans doute les premiers à fabriquer les liants hydrauliques susceptibles de durcir sous l'eau. Pour cela, ils mélangeaient de la chaux et des cendres volcaniques de la région de Pouzzoles, cette propriété d'hydraulicité du mélange ainsi constitué est restée totalement inexpliquée jusqu'aux travaux de **Louis vicat** qui élabore, en 1817, la théorie de l'hydraulicité et fait connaître le résultat de ses recherches. *Vicat* donna des indications précises sur les proportions de calcaire et de silice nécessaires pour constituer le mélange qui, après cuisson à la température convenable et broyage, devient un véritable liant hydraulique fabriqué industriellement appelé le ciment artificiel [4]

En 1824, l'Ecossais Aspdin prit un brevet d'invention de la fabrication d'un liant à partir d'un mélange de chaux et d'argile qu'il appela ciment de portland à cause de l'aspect présenté par ce liant durci qui rappelait celui de la pierre calcaire de la presqu'île de Portland.

Ainsi le XXe siècle a ouvert la voie aux ciments artificiels qui prendront progressivement le pas sur les chaux. L'accélération sera plus manifeste à l'issue de la deuxième guerre mondiale lorsque le secteur du bâtiment produit essentiellement des logements neufs bâtis à partir d'éléments préfabriqués et n'utilisant plus les chaux.

Le développement n'a pu s'effectuer que grâce à l'apparition de matériels nouveaux : four rotatif et broyeurs à boulet en particulier. [5]

1.2.3 Constituants du ciment [3]

Les ciments courants sont principalement constitués du clinker, au quel peut être ajouté du calcaire, du laitier de haut fourneau, des cendres volantes, des fines calcaires, de la pouzzolane naturelle, des schistes calcinés ou des fumées de silice ; cela dans le but de modifier certaines de leurs propriétés et de proposer une gamme de produits capable de résoudre les différents problèmes qui se posent lors de la réalisation de certains ouvrages, soit en raison des conditions environnementales, soit pour des raisons de performances mécaniques :

1.2.3.1 Clinker

Le clinker est un matériau hydraulique se présentant sous la forme de petits nodules très durs. Il est obtenu à la sortie des fours à la suite de la cuisson à 1450°C des matières premières constituées principalement de calcaire, d'argile et de matières de correction. Il est essentiellement composé des quatre phases cristallines suivantes :

- Silicate tricalcique également dénommé « alite », C₃S, dont la formule est $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ (50 à 70%)
- Silicate bicalcique ou « bélite », C₂S, de formule $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ (5 à 25%) ;
- Aluminate tricalcique C₃A, de formule $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ (2 à 12 %) ;
- Alumino-ferrite tétracalcique C₄AF, de formule $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ (0 à 15%)

Les propriétés des ciments varient en fonction des pourcentages respectifs de ces différentes phases. C'est ainsi qu'un ciment contenant 60% de C3S et au moins 10% de C3A présentera de fortes résistances initiales et pourra être avantageusement utilisé en temps froid, alors qu'un ciment contenant au moins 40% de C3S et dont le pourcentage de C3A n'excède pas 5%, présentera une chaleur d'hydratation réduite et sera avantageusement utilisé en temps chaud.

1.2.3.2 Calcaire

Les calcaires sont utilisés comme constituant du ciment et non comme constituant secondaire, lorsqu'ils représentent plus de 5% de la masse totale du ciment. Ils présentent en effet, une proportion de carbonate de calcium CaCO_3 supérieur à 75% en masse, une teneur en argile telle que l'absorption au bleu de méthylène soit au plus de 1,20 g pour 100 g et une teneur en matières organiques (TOC) au plus égale à 0,5%.

1.2.3.3 Laitier de haut fourneau

Le laitier est un matériau hydraulique, sous-produit de la fabrication de la fonte brusquement refroidi par aspersion d'eau. Il se présente sous forme de nodules de 0 à 5 mm semblable au sable. Sa composition chimique comporte de l'oxyde de calcium dans des proportions de l'ordre de 40 à 50%, de la silice 25 et 35%, de l'alumine entre 12 et 30% ainsi que de la magnésie et d'autres oxydes en très faibles quantités, tous ces éléments étant pratiquement les mêmes que ceux du clinker. Au microscope, les grains de laitier se présentent sous forme de fragment transparents, irréguliers et à cassures anguleuses.

1.2.3.4 Cendres Volantes

Les cendres volantes sont des produits pulvérulents de grande finesse, et provenant du dépoussiérage des gaz des chaudières des centrales thermiques. Ils peuvent être siliceuses ou calciques. Dans le premier cas elles présentent des propriétés pouzzolaniques, elles sont alors capables de fixer la chaux à température ambiante, faisant prise et durcissant par hydratation ; et dans le second cas elles peuvent présenter des propriétés hydrauliques appart les propriétés

pouzzolaniques. Les cendres calciques ont une proportion de chaux réactive supérieure à 5%, elles sont les moins utilisées. Les cendres siliceuses elles, doivent avoir une proportion de chaux réactive inférieure à 5%. Elles sont aussi constituées de silice réactive, entre 40 et 55%, proportion qui ne doit pas être en dessous de 5%.

1.2.3.5 Pouzzolanes naturelles

Les pouzzolanes naturelles sont des produits généralement d'origine volcanique, ou des roches sédimentaires. Présentant des propriétés pouzzolaniques, elles sont composées essentiellement de silice réactive (**25%**), d'alumine et d'oxyde de fer.

1.2.3.6 Schistes Calcinés

Ces produits, obtenus à des températures de l'ordre de 800°C, présentent, outre leurs propriétés pouzzolaniques, des propriétés hydrauliques lorsqu'ils sont finement broyés. Actuellement les ciments fabriqués en France ne comportent pas de schistes calcinés.

1.2.3.7 Fumées de Silice

Les fumées de silice sont constituées de particules environ 100 fois plus petites que les grains de ciment. Ayant un diamètre moyen de l'ordre de 1/10 de micron, elles présentent des propriétés pouzzolaniques dues à leur forte teneur en silice amorphe. Puisqu'elles sont très fines, les fumées de silice complètent aussi la granulométrie des ciments. Il en résulte une forte augmentation de la compacité d'une part et une amélioration des résistances mécaniques d'autre part du fait de la réaction pouzzolaniques des fumées de silice. Elles doivent contenir au moins **85%** de silice réactive, la réaction pouzzolaniques s'avérant plus élevées que celles des pouzzolanes naturelles ou des cendres volantes.

1.2.4 Types de Ciments courants [3]

Les types des ciments sont fonction de la teneur en clinker ainsi que d'autres constituants secondaires. Il en existe plusieurs.

La norme NF EN 197-1 classe les ciments courants en 5 types selon la nature et la proportion de leurs constituants.

CEM I: Ciment portland

CEM II: Ciment Portland composé

CEM III : Ciment de haut fourneau

CEM IV : Ciment pouzzolanique

CEM V : Ciment au laitier et aux cendres

D'autres normes existent concernant soit les propriétés particulières (prise mer :PM, résistance aux eaux sulfatées : ES, ...) soit des ciments ayant des normes entièrement spécifiques : ciment alumineux fondu, ciment prompt naturel.

➤ **Le Ciment Portland: CPA-CEM I**

Il contient au moins 95 % de clinker et au plus 5 % de constituants secondaires.

➤ **Le Ciment Portland composé : CPJ-CEM II/A ou B**

Il contient au moins 65 % de clinker et au plus 35 % d'autres constituants : laitiers de haut fourneau, fumées de silice (limitées à 10 %), pouzzolanes naturelles, cendres volantes, calcaires, constituants secondaires. Les ciments Portland et Portland composé englobent aussi bien les ciments gris que les ciments blancs.

➤ **Le Ciment de haut fourneau : CHF-CEM III/A ou B**

Il contient entre 36 et 80 % de laitier et 20 à 64 % de clinker. ... et CLK-CEM III/C (ex. ciment de laitier au clinker) Il contient au moins 81 % de laitier et 5 à 19 % de clinker.

➤ **Le Ciment au laitier et aux cendres : CLC-CEM V/A ou B**

Il contient de 20 à 64 % de clinker, de 18 à 50 % de cendres volantes et de 18 à 50 % de laitier. Tous ces ciments peuvent comporter au plus 5 % de constituants secondaires.

➤ **Le Ciment pouzzolanique : CPZ-CEM IV/A ou B**

Il contient 45 à 90% de clinker, 10 à 55% de pouzzolanes, cendres siliceuses ou fumé de silice, ces dernières étant limitées à 10%. La teneur en constituants secondaires est limitée à 5% au plus.

1.2.5 Classe de Résistance [6]

Les ciments sont répartis en trois classes de résistance, 32,5 - 42,5 - 52,5, définies par la valeur de la résistance normale du ciment à 28 jours

Pour chaque classe de résistance, deux classes de résistance au jeune âge sont définies, une classe avec résistance au jeune âge ordinaire (indiquée par la lettre N) et une classe avec résistance au jeune âge élevée (indiquée par la lettre R).

La résistance normale d'un ciment est la résistance mécanique à la compression mesurée à 28 jours conformément à la norme NF EN 196-1 et exprimée en N/mm² (1 N/mm² = 1 MPa = 10 daN/cm² = 10 bars).

Pour les ciments de classes 32,5 et 42,5, une valeur maximale de la résistance normale à 28 jours est fixée et est donnée dans le tableau 1-1.

Tableau 1-1: Classes des résistances [3]

Désignation de la classe	Résistance à la compression(en MPa)			
	Résistance à court terme		Résistance courante à 28jours	
	à 2 jours	à 7 jours		
32.5N	-	>16	>32.5	<52.5
32.2R	>13.5	-		
42.5N	>12.5	-	>42.5	<62.5
42.2R	>20	-		
52.5N	>20	-	>52.5	
52.5R	>30	-		

1.2.6 Caractéristique du ciment courant

On distingue trois groupes principaux des caractéristiques du ciment courant notamment les caractéristiques physiques, caractéristiques chimiques et caractéristiques mécaniques.

1.2.6.1 Caractéristiques physiques

On distingue neuves caractéristiques physiques du ciment comprenant l'indice d'hydraulicité, la prise, le durcissement, la fausse prise, la chaleur d'hydratation, la finesse de mouture, le retrait, l'expansion et le gonflement.

i. Indice d'hydraulicité

L'indice d'hydraulicité, appelé également Indice de Vicat est le rapport de la fraction acide du ciment à la fraction basique et se traduit par la relation 1.1 :

$$I = \frac{\text{fraction acide}}{\text{fraction basique}} = \frac{Si\ O_2 + Al_2\ O_3}{Ca\ O + Mg\ O} \quad (1.1)$$

La résistance chimique d'un ciment est d'autant meilleure que son indice est plus élevé. Ainsi donc, si $I > 0,5$ le ciment est dit basique et si $I \leq 0,5$ le ciment est dit neutre c'est-à-dire riche en laitier.

ii. Prise

Le phénomène de prise, qui s'accompagne d'un dégagement de chaleur plus ou moins important, est lié à de nombreux paramètres :

- Le type de ciment : certains d'entre eux ayant des temps de prise beaucoup plus courts que d'autres dans les mêmes conditions d'ambiance ;
- La finesse de mouture : le début de prise étant d'autant plus rapide que la finesse de mouture est grande ;
- La température ambiante : la prise étant stoppée à 0 °C, alors qu'elle est très accélérée lorsque la température dépasse 30 °C ;
- La présence des matières organiques dans l'eau ;
- L'excès d'eau de gâchage qui agit comme retardateur.

La norme spécifie, suivant les ciments, un temps de prise minimal de 1h30 pour les ciments des classes 32,5 et 32,5 R ; 1h pour les ciments des classes 42,5 ; 42,5 R ; 52,5 et 52,5R (FESTA & DREUX, 1998). D'une façon générale, les temps de prise sont supérieurs à ces valeurs

minimales, l'ordre de grandeur étant de 2h30 à 3h30 pour la grande majorité des ciments à une température ambiante de 20 °C.

iii. Le durcissement

Une fois la prise amorcée, le phénomène d'hydratation se poursuit, c'est la période de durcissement qui se poursuit pendant des mois voire des années au cours desquelles les résistances mécaniques continuent de croître.

Lorsqu'on désire un durcissement rapide, on choisit des ciments de classe élevée et de préférence de classe R, c'est-à-dire ayant la caractéristique complémentaire « rapide ».

iv. Fausse prise

Dans la composition des ciments rentre généralement un peu de gypse. Si les clinkers sont trop chauds ou s'échauffent trop au cours du broyage, il se forme alors un peu de plâtre dont la prise très rapide donne l'impression d'un début de prise, c'est la fausse prise. Dans ce cas, il ne faut surtout pas ajouter d'eau mais augmenter la durée de malaxage. Les ciments les plus sensibles sont ceux à très fine mouture ou à assez fort pourcentage de gypse.

v. Chaleur d'hydratation

La dissolution des différents constituants est exothermique et, selon leurs pourcentages relatifs, le dégagement de chaleur est plus ou moins important, c'est le cas par exemple des ciments riches en C3A que l'on cherchera à utiliser par temps froid ou en préfabrication, alors qu'on aura intérêt à les éviter par temps chaud. Suivant les ciments, cette chaleur est comprise à 12 heures, approximativement, entre 65 J/g par exemple pour certains CHF-CEM III/B et 300 J/g pour certains CPA-CEM I. La finesse de mouture a également une action sur l'exothermie.

vi. Finesse de mouture

La finesse de mouture est la représentation de la surface spécifique ou de la surface développée d'une masse de 1 kg de ciment. Elle est aussi employée sous un autre vocabulaire appelé finesse Blaine et est exprimée en m²/kg. Généralement la valeur de la finesse de mouture est comprise entre 300 et 350 (FESTA & DREUX, 1998) ; quant à d'autres ciments,

tels que les ciments prompts naturels ont une finesse de mouture supérieure à 450 m²/kg. Plus la valeur de la finesse est grande, plus grandes sont les résistances précoces.

vii. Retrait

On appelle retrait la diminution du volume apparent d'un corps. Pour le cas des ciments, le retrait est mesuré sur des éprouvettes prismatiques de dimension 4x4x16 cm conservées dans l'air à une température ambiante de 20 °C et une hygrométrie de 50 %. La norme impose les valeurs limites à 28 jours de (FESTA & DREUX, 1998) :

- 800 µm/m cas des ciments portland CPA-CEM I et CPJ-CEM II avec comme classe 32,5
- 1 000 µm/m cas des ciments identiques mais des classes 32,5 R ; 42,5 et 42,5 R.

viii. Expansion

Les causes possibles de l'expansion viennent de l'hydratation des oxydes de calcium ou de magnésium que peuvent contenir certain ciment sous forme de chaux ou de magnésie libre.

ix. Gonflement

Bien que non normalisé, il est utile de rappeler qu'alors qu'il se rétracte dans l'air, le ciment augmente de volume lorsqu'il est immergé dans l'eau, ces variations dimensionnelles étant environ le un dixième de celles constatées dans l'air.

1.2.6.2 Caractéristiques mécaniques

Les ciments courants sont classés en fonction de leurs résistances mécaniques à la compression exprimées en MPa à 28 jours, la norme spécifie une limite inférieure et une limite supérieure dont les valeurs sont reprises dans le tableau 1-2.

Tableau 1-2: Caractéristiques mécaniques des ciments courants (FESTA & DREUX, 1998)

[3]

Classe des ciments	Résistance à 2jours	Résistance minimale à 28jours	Résistance maximale à 28jours
32,5		$\geq 32,5$	$\leq 52,5$
32,5 R	$\geq 13,5$	$\geq 32,5$	$\leq 52,5$
42,5	$\geq 12,5$	$\geq 42,5$	$\leq 62,5$
42,5R	≥ 20	$\geq 42,5$	$\leq 62,5$
52,5	≥ 20	$\geq 52,5$	
52,5R	≥ 30	$\geq 52,5$	

Les classes « **R** », rapides, présentent aux jeunes âges des caractéristiques mécaniques très élevées et trouvent leur intérêt particulièrement dans certaines circonstances telles que bétonnage par temps froid, décoffrage rapide, préfabrication, ...

Il y a lieu de distinguer les valeurs spécifiées pour chaque classe de ciment (*tableau 1-2*), la probabilité étant statistiquement de **95 %** pour les résistances minimales et de **90 %** pour des résistances maximales, et les valeurs garanties que le fabricant doit respecter à **100 %** sont indiquées dans le tableau 1-3.

Tableau 1-3: Valeurs des résistances garanties des ciments courants (FESTA & DREUX,1998) [3]

Classe des ciments	Résistances garanties à 2jours	Résistances garanties à 7jours	Résistances garanties à 28jours
32,5		17,5	30
32,5R	12		30
42,5	10		40
42,5R	18		40
52,5	18		50
52,5R	28		50

1.2.7 Domaine d’emplois des ciments

Le choix du ciment dépend largement de son domaine d’emploi, car chaque type de ciment possède des caractéristiques spécifiques qui le rendent plus adapté à certaines applications, telles que les ouvrages en béton armé, les travaux de maçonnerie ou les constructions exposées à des conditions climatiques particulières.

1.2.7.1 Ciments portland CEM I

Les CEM I conviennent pour le béton armé ou le béton précontraint, en revanche leurs caractéristiques mécaniques n’en justifient généralement pas l’emploi pour les travaux de maçonnerie courante et les bétons en grande masse ou faiblement armé.

Les CEM I de classe R permettent un décoffrage rapide appréciable notamment en préfabrication. Les CEM I 52,5N ou 52,5R conviennent pour le béton armé ou précontraint pour lesquels est recherchée une résistance élevée. Pour les travaux en milieu agressif, eaux de mer ou eaux sulfatées, on emploiera respectivement des ciments portland pour travaux à la mer PM, ou pour travaux en eaux à haute teneur en sulfates ES.

1.2.7.2 Ciments portland composés CEM II

Les CEM II 32,5 conviennent bien pour les travaux de maçonnerie. Les CEM II 32,5 N et 42,5 N conviennent pour les travaux de toute nature en béton armé. Les CEM II 52,5 sont adaptés au béton précontraint et au béton armé.

Des façons générales, les CEM II sont bien adaptés pour les travaux massifs exigeant une élévation de température de façon modérée. La classe R sera préférée pour les travaux exigeant des résistances initiales plus élevés. Pour les travaux en milieu agressifs, on emploiera les ciments pour travaux à la mer (PM) ou résistants aux eaux sulfatées (ES).

1.2.7.3 Ciments de haut fourneau CEM III

Ces ciments sont bien adaptés aux travaux suivants :

- Travaux hydrauliques, souterrains, fondations, injections
- Travaux en eaux agressives : eaux de mer, eaux séléniteuses, eaux industrielles et eaux pure
- Ouvrages massifs : fondations et barrages
- Travaux en milieu agricole : stockage, ensilage et fosse à lisier.

1.2.7.4 Ciments pouzzolaniques CEM IV

Ayant une bonne résistance mécanique, mais sensible au froid, le ciment pouzzolanique est destiné en particulier à des travaux massifs en béton armé ou précontraint, aux travaux maritimes et aux ouvrage étanches.

1.2.7.5 Ciments au laitier et aux cendre CEM V

Ces ciments sont bien adaptés aux travaux hydrauliques, aux travaux en eaux agressives, aux ouvrages massifs ainsi qu'aux travaux en milieu agricole.

1.3 GENERALITES SUR LES MORTIERS

1.3.1 Introduction

Le mortier est un matériau pouvant satisfaire à une variété d'exigences dans le domaine de la construction. Le mortier est utilisé car il permet de caractériser directement les propriétés du ciment sans influence des gros granulats présents dans le béton. Toutefois, il n'existe pas de mortier universel, convenant à toutes les situations. Le concepteur ne pourra choisir le mélange convenant le mieux pour un projet donné que s'il a une bonne connaissance des matériaux qui entrent dans la composition du mortier et de leurs propriétés. La fonction principale d'un mortier est de liasonner les éléments de maçonnerie de manière à ce qu'ils constituent un seul bloc. Par ailleurs, le mortier sépare les éléments et remplit toutes les fentes et fissures en formant une surface de contact homogène. Le rejointoiement doit permettre de renforcer les propriétés structurales des éléments et en même temps empêcher la pénétration de la pluie. [7]

1.3.2 Composition du mortier [7]

Par définition, les mortiers contiennent des liants, des granulats et de l'eau ; éventuellement des adjuvants.

- **Liants** : peut être du ciment portland, de la chaux ou du ciment de maçonnerie, ou un des divers mélanges de ces matériaux.
- **Chaux** : qui est le composant traditionnel du mortier, possède une plasticité et un pouvoir de rétention d'eau excellent, mais sa résistance mécanique est faible et sa cure est lente. La cure des mortiers de chaux s'effectue lentement par carbonatation sous l'effet du gaz carbonique de l'air ; ce processus peut être fortement ralenti par temps froid et humide.

- **Ciment de maçonnerie** : est un produit déposé contenant du ciment portland et un filler minéral inerte (calcaire) et des adjuvants tels que des agents mouillants, des agents hydrofuges et des entraîneurs d'air.
- **Adjuvants** : donnent la plasticité et le pouvoir de rétention d'eau que confère la chaux aux mortiers de ciment et chaux. Certains ciments de maçonnerie sont des mélanges de ciment portland et de chaux hydratée, avec en plus des adjuvants.
- **Granulats** : Le sable est le granulat le plus employé fréquemment. Il est inerte et sert tout d'abord à accroître la compacité. Ses limites granulométriques sont entre 0,080 mm et 4 mm
- **Eau** : remplit un double rôle : elle sert à hydrater le ciment et ce qui est plus important, elle contribue à son ouvrabilité. Les mortiers devraient contenir la quantité d'eau maximale compatible avec une ouvrabilité optimale. L'eau devrait être propre et ne pas contenir de produits nocifs tels que des acides, des alcalis ou des matières organiques. Lorsqu'elle est potable, on peut l'utiliser.

La figure 1-1 montre les différents composants du mortier. [8]

Mortier de ciment	Ciment 	Sable 	Eau Jusqu'à obtenir un mélange... 
Pose de briques et parpaings	50 kg	120 à 130 litres	Onctueux
Sous couche d'enduit	50 kg	120 à 130 litres	Presque liquide
Mortier de chape maigre	50 kg	180 litres	Pâteux

Figure 1-1 : Composition du mortier

1.3.3 Types des mortiers selon les liants utilisés [9]

Les types de mortiers sont choisis selon l'application. On utilise, comme pour les bétons, des formulations variées selon l'ouvrage à réaliser et les propriétés recherchées.

- **Les mortiers de ciment** : Les mortiers de ciment, très résistants, prennent et durcissent rapidement. De plus un dosage en ciment insuffisant les rend pratiquement imperméables. Les dosages courants sont de l'ordre de 300 à 400 kg de ciment pour 1 m³ de sable.
- **Les mortiers de chaux** : Les mortiers de chaux sont gras et onctueux. Ils durcissent plus lentement que les mortiers de ciment, surtout lorsque la chaux est calcique.
- **Les mortiers bâtards** : Le mélange de ciment et de chaux permet d'obtenir conjointement les qualités de ces deux liants. Généralement, on utilise la chaux et le ciment par parties égales mais on mettra une quantité plus ou moins grande de l'un ou de l'autre suivant l'usage et la qualité recherchée.

1.3.4 Types des mortiers selon l'usage [9]

Les mortiers se déclinent en plusieurs types selon leur usage, chaque catégorie étant conçue pour répondre à des besoins spécifiques, qu'il s'agisse de la maçonnerie, du revêtement, de la finition ou de la protection des ouvrages.

1.3.4.1 Mortier Ciment

Ce matériau sera utile pour toutes les constructions classiques (murs, chapes, etc.), qui ne nécessitent pas l'usage d'un mortier spécifique. L'avantage du ciment est qu'il profite d'une excellente résistance à la compression. Il durcit également plus vite que la plupart des autres solutions.

Les dosages courants sont de l'ordre de : 300 à 400 kg de ciment pour 1 m³ de sable. De plus un dosage en ciment insuffisant les rend pratiquement imperméables.

1.3.4.2 Mortier Hydrofuge

Comme son nom l'indique, le mortier hydrofuge est un mortier résistant à l'eau, qui permet d'éviter les problèmes d'humidité sur une surface. Il permet de :

- ✓ Boucher des fissures,
- ✓ Enduire un mur,
- ✓ Réaliser des chapes.

On l'utilise avant tout dans les lieux humides (salle de bain, extérieur, etc.) ou encore pour concevoir des réalisations étanches, comme un bassin de piscine.

1.3.4.3 Mortier Réfracteur

Le mortier réfractaire est un mortier résistant aux hautes températures. Selon les préparations, il peut généralement résister à des températures de 900° ou moins.

En toute logique, il est uniquement utilisé pour les constructions qui sont exposées à ce type de températures, à savoir pour le montage et le jointement des :

- ✓ Foyers de cheminée,
- ✓ Des barbecues maçonnés.

Ce matériau protège ainsi les joints et la structure des constructions exposées aux flammes et à la chaleur. Il n'est cependant jamais utilisé sur des constructions qui n'en ont pas besoin ?

1.3.5 Types des mortiers en fonction du dosage du liant

La classification des mortiers en fonction du dosage du liant repose sur une approche volumique des constituants, notamment le sable et le liant, en tenant compte du volume des vides présents dans le sable, que le liant doit combler pour assurer la cohésion et la compacité du mélange.

1.3.5.1 Mortier normal

C'est un mortier qui contient en volume une partie de liant pour trois parties de sable normal. Avec ces proportions le liant remplit les vides du sable, c'est à dire que 1m³ de sable plus 1/3 de m³ de liant ne fournit qu'un m³ de mortier. La relation 1.2 correspondant au mortier normal, pour laquelle le volume de liant compense les vides du sable.

$$1 \text{ m}^3 \text{ de sable} + 1/3 \text{ liant (m}^3\text{)} = 1 \text{ m}^3 \text{ de mortier} \quad (1.2)$$

1.3.5.2 Mortier maigre

Le mortier est qualifié de maigre lorsque le volume de liant est inférieur au volume des vides du sable, cette insuffisance de liant entraîne une faible cohésion entre les grains, rendant le mortier moins résistant et plus difficile à mettre en œuvre. La relation 1.3 caractérise le mortier maigre.

$$1 \text{ m}^3 \text{ de sable} + 1/4 \text{ liant (m}^3\text{)} < 1 \text{ m}^3 \text{ de mortier} \quad (1.3)$$

1.3.5.3 Mortier gras

Le mortier est dit gras lorsque le volume de liant est supérieur au volume des vides du sable. Cet excès de liant améliore la plasticité et la maniabilité du mélange, mais peut entraîner un retrait plus important lors du durcissement. La relation 1.4 correspond au mortier gras.

$$\text{Volume de mortier} > 1 \text{ volume de sable} \quad (1.4)$$

La figure 1-2 montre les différents dosages de mortier en terme de sacs de ciments. [10]

Le dosage du mortier pour un sac de ciment					
Utilisation	Ciment	Chaux	Sable fin Granulométrie : type 0,2 mm Densité : 1,57/m ³	Sable à maçonner Granulométrie : type 0,5 mm Densité : 1,57/m ³	Eau Environ
Assemblage de parpaings Ex : Parpaings 20x20x50 cm pour 7 m ²	50 Kg			250 Kg soit 167 litres	25 L
Assemblage de briques Ex : Briques 6x11x22 cm pour 7 m ² avec mortier bâtard	25 Kg	25 Kg	200 Kg soit 135 litres	50 Kg soit 34 litres	25 L
Chape sur sol béton	50 Kg			200 Kg soit 135 litres	25 L
Enduit de façades traditionnel pour 20 m ² <u>Première couche</u> gobets 3 à 5 mm	50 Kg		150 Kg soit 100 litres		25 L
Enduit bâtard <u>Deuxième couche</u> corps d'enduit 15 à 20 mm	50+50 Kg	50 Kg		690 Kg soit 460 litres	75 L
<u>Troisième couche</u> finition 5 à 7 mm	20 Kg	20 Kg	175 Kg soit 117 litres		10 L
1 m³ Mortier de joint pour pierres	50 Kg		66 Kg soit 44 litres		25 L
Mortier de joint pour briques	25 Kg	25 Kg	66 Kg soit 44 litres		25 L
Mélanger à sec puis tamiser avant l'ajout d'eau afin d'obtenir des joints malléables					

Figure 1-2 : dosage du mortier pour un sac de ciment

1.4 GENERALITES SUR LE BETON

1.4.1 Introduction

Le béton est une pierre artificielle obtenue grâce au durcissement d'un mélange de liant, d'eau, de granulats avec éventuellement des adjuvants choisis de façon rationnelle. Lorsqu'il ne comporte pas les graviers, il est appelé mortier. Ce mélange, mis en place sur le chantier ou

en usine à l'état plastique, peut adopter des formes très diverses parce qu'il est moulable ; il durcit progressivement pour former finalement un monolithe [3]

1.4.2 Composition du béton

Le béton est un mélange de plusieurs composants : le ciment, eau, air, granulats et éventuellement les adjuvants qui doivent constituer un ensemble homogène. Ces composants sont très différents : leurs masses volumiques vont, dans le béton courant, de 1 (eau) à 3 (ciment) t/m³ ; les dimensions de leurs grains s'échelonnent de 0,5µm (grain le plus fin du ciment) à 25mm (gravillons).

Le béton se compose de granulats (sables, graviers, cailloux) 'collés' entre eux par un liant hydraulique : le ciment. Lorsque le ciment se trouve en présence d'eau, il fait prise, puis durcit progressivement. Un béton hydraulique est constitué d'une pâte pure (ciment + eau), d'un mélange granulaire et de produits additionnels (adjuvants, additions minérales, ...). On appelle la matrice ou le mortier le mélange (liant + eau + sable) alors que l'on appelle squelette solide ou de squelette granulaire : le mélange des granulats. La figure 1-3 présente le volume des vides et des solides dans le béton [3].

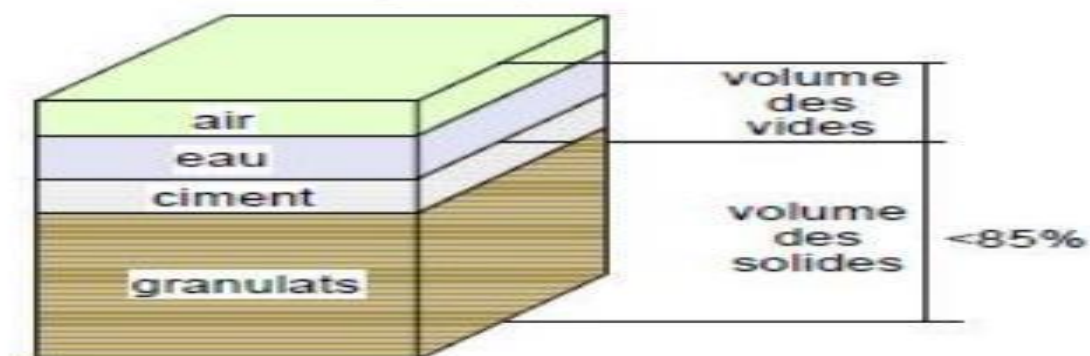


Figure 1-3 : Volume des vides et des solides dans le béton

1.4.3 Typologie des bétons

Selon les propriétés recherchées, le type de liant utilisé, l'usage destiné au béton, il existe plusieurs types des bétons parmi lesquelles nous pouvons citer : le béton ordinaire, le béton à haute performance, le béton à très haute performance, le béton de fibres métalliques, le

béton de poudre réactives, le béton caverneux, le béton précontraint et le béton autoplaçant. Cela étant, nous développons l'impact du béton dans la partie suivante.

1.4.4 Utilisation du béton dans le bâtiment [11]

Le béton tient une place essentielle dans l'urbanisme moderne. Cela semble normal lorsqu'on considère sa participation dans la construction de logements : pour les murs, 80 % des techniques en individuel, plus de 90 % en collectif pour les structures ; pour les planchers le béton est pratiquement le matériau idéal. Le béton s'est également largement imposé dans les autres secteurs de la construction : bureaux, hôpitaux, locaux scolaires, ainsi que dans les grands édifices publics et les bâtiments industriels

Dans un bâtiment, diverses fonctions sont assurées par le gros œuvre ; on peut les classer en quatre fonctions essentielles :

- La fonction structure,
- La fonction plancher,
- La fonction enveloppe,
- La fonction couverture.

Le béton apporte dans ces quatre fonctions une réponse très largement positive à la satisfaction des exigences qu'est en droit d'avoir l'utilisateur.

1.4.5 Utilisation des bétons dans le travaux publics [11]

Tout comme dans le bâtiment, le béton est utilisé dans les travaux public et joue un rôle primordial notamment dans la construction des ponts, des tunnels, des barrages, des routes et d'autres ouvrages à intérêt public.

1.4.5.1 Pont

Les progrès techniques, et en particulier l'évolution des caractéristiques du béton, permettent de réaliser des portées atteignant plusieurs centaines de mètres.

1.4.5.2 Tunnel

Pour les grands tunnels, dont les exemples se multiplient dans le monde, le béton est soit coulé en place, soit utilisé dans des voussoirs préfabriqués. Ceux-ci sont posés à l'avancement de la machine à forer, le tunnelier.

1.4.5.3 Barrage

Les grands barrages sont le plus souvent en béton permettant des implantations dans les sites les plus difficiles.

1.4.5.4 Route

La chaussée béton prend une part de plus en plus importante dans les grandes voiries routières et autoroutières, grâce au développement de techniques modernes : béton armé continu, dalle épaisse, traitement de surface. Les voiries à faible trafic et aménagements urbains montrent un regain d'intérêt pour les solutions béton, qui leur assurent durabilité et faible coût d'entretien.

1.5 CONCLUSION PARTIELLE

Le présent chapitre a porté sur la revue de la littérature, tout au long de ce dernier, nous avons présenté une littérature en rapport avec les matériaux cimentaires. Ce chapitre offre une base théorique solide pour comprendre les propriétés et les comportements des matériaux cimentaires, préparant ainsi le terrain pour les expérimentations du chapitre suivant.

Chapitre 2 MATERIAUX ET METHODOLOGIE DU TRAVAIL

2.1 INTRODUCTION

Le présent chapitre traite sur la présentation des matériaux utilisés ainsi que les différentes méthodes qui ont conduit notre expérimentation.

Ce chapitre donne un aperçu sur la nature et l'origine des matériaux utilisés, présente le mode opératoire des différents essais effectués au laboratoire de Génie Civil de la Faculté de Sciences et Technologies de l'ULPGL/Goma.

2.2 NATURE ET ORIGINE DES MATERIAUX

Les matériaux utilisés dans la mise en œuvre de notre travail sont de diverses natures et origines ainsi donc il est important de rappeler qu'il s'agit ici du ciment, de l'eau, et du sable.

2.2.1 Sable

Le sable utilisé pour notre expérimentation est le sable lavé provenant d'**IDWJI**, la figure 2-1 visualise le sable de rivière.



Figure 2-1 : Sable de rivière

2.2.2 Eau de gâchage

L'eau de gâchage utilisée est potable et cette dernière est fournie par la Régie de distribution d'eau (**REGIDESO**). Recueilli directement au niveau du robinet, cette eau ne contient pas d'impuretés (matières organiques ou chimiques) pouvant nuire à la qualité du béton ou du mortier.

2.2.3 Ciment

Les ciments utilisés pour cette expérimentation sont au nombre de deux dont :

- Le ciment **HIMA CEMENT (CEM IV/B-P 32,5N)** de couleur grise, produit en **Ouganda**, de classe commerciale **32,5Mpa**
- Le ciment **CIMERWA (CEM II/B-P 32,5N)** de couleur grise, produit au **RWANDA**, de classe commercial **32,5Mpa**. Les figures 2-2 et 2-3 montrent les types ciments utilisés.

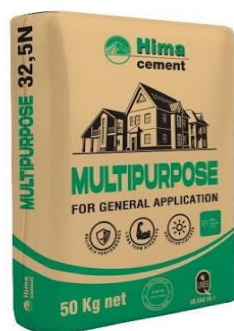


Figure 2-2 : Ciment HIMA



Figure 2-3 : Ciment CIMERWA

2.3 CARACTERISATION DES MATERIAUX

Ici nous allons décrire l'ensemble des essais que nous aurons à effectuer au niveau du laboratoire, il s'agit ici de l'essai de prise, l'essai de consistance, de l'essai du degré de propreté du sable, l'analyse granulométrique, la résistance à la flexion et à la compression du mortier, la masse volumique apparente du sable ainsi que la détermination de la masse volumique (absolue) des ciments et du sable.

Il est convenable de signaler avant tout qu'en amont de toutes ces essais, nous avons d'abord l'opération d'échantillonnage qui est une étape indispensable pour la suite des opérations.

2.3.1 Essais sur le sable

Les essais effectués en laboratoire portent nécessairement sur des quantités réduites des matériaux, celles-ci devant permettre de mesurer les paramètres caractéristiques de l'ensemble de matériau sur lequel on effectue le prélèvement. L'échantillon prélevé doit être représentatif de l'ensemble

2.3.1.1 Analyse granulométrique [12]

La composition granulométrique est déterminée par un essai d'analyse granulométrique qui est normalisé NF EN 933-1 (2012). Dans cette section nous présentons le but, le principe, le mode opératoire, l'appareillage et l'expression des résultats.

2.3.1.1.1 But

L'analyse granulométrique a pour objectif de déterminer la répartition pondérale des grains d'un granulat suivant leurs dimensions par traçage de la courbe granulométrique. Et d'en déduire le module de finesse en utilisant les tamis : 0.08, 0.160, 0.315, 0.63, 1.25, 2.5 et 5mm.

2.3.1.1.2 Principe

Le principe de l'analyse granulométrique consiste à fractionner au moyen d'une série de tamis un matériau en plusieurs classes granulaires de tailles décroissantes. A l'issue du fractionnement, les masses de différents refus et tamisas obtenus sont rapportées à la masse initiale du matériau et les pourcentages ainsi obtenus sont exploités sous forme de graphique.

2.3.1.1.3 Mode opératoire

Le mode opératoire employé pour l'analyse granulométrique est conforme à la norme NF EN 933-1 (2012). Il consiste à :

- Nettoyer Les tamis à l'aide d'une brosse métallique

- Constituer la colonne de tamis en respectant l'ordre 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 ; 630µm ; 400µm ; 315µm ; 250 µm ; 160 µm ; 125µm et 80 µm)
- Introduire l'échantillon de Masse Ms sur le tamis 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 ;
- Tamiser 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 Ms, et déduction des pourcentages des tamisât cumulés.

2.3.1.1.4 Expression des résultats

Les masses des différents refus ont été rapportées à la masse initiale du matériau et ont été exprimées en pourcentage. Ces pourcentages ont servi dans le traçage de la courbe granulométrique sur un graphique comportant en ordonnée le % des refus et les mailles D en abscisse.

i. Détermination du module de finesse

Le module de finesse d'un granulat est égal au 1/100^e de la somme des refus, exprimés en pourcentages sur les différents tamis de la série suivante pour le sable : 0,16 - 0,315 - 0,63 - 1,25 - 2,5 et 5mm. Il a donc été déterminé par la formule 2.1:

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

Un bon sable à béton doit avoir un module de finesse d'environ 2,2 à 2,8 ; au-dessous, le sable a une majorité d'éléments fins et très fins, ce qui nécessite une augmentation du dosage en eau ; au-dessus, le sable manque de fines et le béton y perd en ouvrabilité

ii. Coefficient d'uniformité et coefficient de courbure

Le coefficient d'uniformité et le coefficient de courbure sont deux coefficients que l'on calcule après avoir fait l'analyse granulométrique. Une fois que l'on a tracé la courbe granulométrique on s'y réfère afin de trouver les différentes valeurs qui interviennent dans le calcul de ces deux coefficients.

Pour le calcul du coefficient d'uniformité, on a la formule 2.2 :

$$Cu = \frac{d_{60}}{d_{10}} \quad (2.2)$$

Avec :

- **Cu** : coefficient d'uniformité
- **D_y** : dimension du tamis correspondant à y % de passants

Pour le coefficient de courbure, on a la formule 2.3:

$$Cc = \frac{(d_{30})^3}{d_{10} \cdot d_{60}} \quad (2.3)$$

Avec :

Cc : coefficient de courbure

2.3.1.2 Degré de propreté du sable [12]

Le degré de propreté du sable est déterminé par l'essai d'équivalent de sable qui est un essai normalisé NF EN 933-8 (1999). Nous présentons le but, le principe, le mode opératoire ; l'expression des résultats et l'interprétation des résultats.

2.3.1.2.1 But

Le but de l'essai d'équivalent de sable est de déterminer le degré de propreté d'un sable. Il désigne la proportion du sable brut par rapport aux impuretés le contenant.

2.3.1.2.2 Principe

Le principe de l'essai d'équivalent de sable se résume à l'introduction d'une masse 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.

2.3.1.2.3 Mode opératoire

L'essai d'équivalent de sable s'effectue sur un échantillon de sable sec d'une masse sèche équivalent à 120g afin d'éviter les pertes des fines particules suivant les prescriptions de la norme NF EN 933-8 (1999). La procédure suivie est :

- Remplissage de deux éprouvettes par la solution lavante jusqu'au premier repère, suivit du versement de la quantité de sable tarée sujet de l'essai ;
- Elimination des bulles d'air en frappant chaque éprouvette contre la paume de la main suivi d'un repos de 10 minutes ;
- Bouchage des éprouvettes suivit de l'agitation à l'agitateur 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) ;
- Lavage et remplissage des éprouvettes avec le tube laveur en rinçant le bouchon, lavant les parois intérieures de toutes les éprouvettes et laver la masse du sable en y faisant remonter et descendre lentement le tube ainsi les fines remontent en surface ;
- Fermeture du robinet au deuxième trait de jauge (supérieur) et on sort le tube laveur ;
- Repos des 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 ; .

2.3.1.2.4 Expression des résultats

Les résultats de l'équivalent de sable s'expriment en pourcentage. Ils se calculent à partir de la formule 2.4 :

$$Es = \frac{h_2}{h_1} * 100 \quad (2.4)$$

Avec :

Es : Equivalent sable

h2(cm) : La hauteur du dépôt de sable visible.

h1(cm) : La hauteur totale y compris le floculat (fines en suspension)

Après calcul si :

- **Es ≥ 80** : Bons sable
- **70 < Es < 80** : A n'utiliser qu'exceptionnellement à condition d'employer le ciment Portland
- **Es < 70** : A laver pour éliminer les éléments fins

2.3.1.3 Masse volumique apparente du sable [12]

La masse volumique apparente est déterminée par un essai normalisé NF P 18-555 . Nous présentons le but, le principe, le mode opératoire, l'appareillage et l'expression des résultats.

2.3.1.3.1 But

Le but de la masse volumique apparente d'un matériau est d'exprimer la masse d'un mètre cube du matériau pris en tas, comprenant à la fois des vides perméables et imperméables de la particule ainsi que les vides entre particules.

2.3.1.3.2 Principe

Le principe de l'essai de détermination de masse volumique apparente se résume au remplissage d'une mesure de 1m³ par les granulats secs afin d'en déduire sa masse par unité de volume

2.3.1.3.3 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). 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
- Arasage à la règle le débordement ;
- Pesage du contenu et prise de Ms la masse correspondante ;

2.3.1.3.4 Expression des résultats

Les résultats de l'essai de masse volumique apparente se sont exprimés en g/cm³ et se calculent à partir de la formule 2.5 .

$$\mathbf{M_{app} = \frac{m}{v}} \quad (2.5)$$

Avec :

- **M_{app}** : Masse volumique apparente
- **M** : Masse du matériau sèche en g
- **V** : Volume du récipient en cm³

2.3.1.4 Masse volumique absolue du sable [12]

La masse volumique absolue est déterminée par un essai normalisé NF P 18-555(1990) . Nous présentons le but, le principe, le mode opératoire ; l'appareillage et l'expression des résultats.

2.3.1.4.1 But

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.

2.3.1.4.2 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.

2.3.1.4.3 Mode opératoire

La détermination de la masse volumique absolue s'effectue sur des granulats secs, d'environ 300g de masse sèche notée Ms. Le mode opératoire suivi est conforme à la norme NF P 18-555 (1990). L'essai a consisté à :

- L'introduction d'une quantité V_1 d'eau dans une éprouvette graduée ;
- L'introduction des granulats secs de masse Ms 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

2.3.1.4.4 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 formule 2.6 :

$$\mathbf{M_{abs} = \frac{m}{V_2 - V_1}} \quad (2-6)$$

Avec :

- **M_{abs}**: Masse volumique absolue
- **m** : Masse sèche de l'échantillon ;
- **V₂**: Volume d'eau avec les granulats,
- **V₁** : Volume d'eau dans l'éprouvette gradué

2.3.2 Essais sur le ciment

2.3.2.1 Essai de consistance [12]

La consistance normale du ciment est déterminée par l'essai normalisé (NF EN 196-3, Août 1995).

2.3.2.1.1 But

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.

2.3.2.1.2 Principe

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.

2.3.2.1.3 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;

2.3.2.1.4 Expression des résultats

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

2.3.2.2 Essai de temps prise [12]

La prise du ciment est déterminée par l'essai normalisé appelé l'essai de prise (NF EN 196-3, Août 1995) consistant à déterminer le temps disponible pour la mise en œuvre in situ des mortiers et des bétons.

2.3.2.2.1 But

Le but est de mesurer le temps de prise du ciment à l'aide de l'appareil de Vicat, autrement dit, le temps qu'il faut pour qu'il se solidifie. Pour cela on mesurera l'enfoncement de l'aiguille dans le ciment, du temps de gâchage et le temps de début de prise. L'appareil de Vicat est utilisé à la fois à la mesure du temps de début et de fin de prise.

2.3.2.2.2 Mode opératoire

Pour cet essai, l'appareil de Vicat doit être muni de son aiguille de Vicat :

- Abaisser l'aiguille jusqu'à ce qu'elle arrive au contact de la pâte ;
- Libérer les parties mobiles ;
- Noter la valeur « d » indiquée par l'index ;
- Répéter l'essai sur la même pâte, à des positions espacées de plus de 10 mm des bords du moule à des intervalles de temps réguliers ;
- Noter, à 5 minutes près, le temps mesuré depuis l'instant zéro, au bord duquel la valeur « d » est de $4 \pm 1 \text{ mm}$ comme temps 1 : temps de début de prise de ciment.

Pour évaluer la fin de prise, L'appareil de Vicat doit être muni de son aiguille de fin de prise. La procédure ci-dessous doit être respectée.

- Retourner le moule sur sa plaque ;
- Remplacer l'aiguille de Vicat par l'aiguille de fin de prise ;

- Noter, à 15 minutes près, le temps mesuré depuis l'instant zéro, au bout duquel l'aiguille ne pénètre plus qu'à 0,5 mm, c'est le temps 2 : temps de fin de prise.

2.3.2.3 Masse volumique absolue du ciment [3]

La masse volumique absolue du ciment est déterminée par un essai normalisé. Le mode opératoire inclut les actions ci-après :

- Introduire la solution dans le pycnomètre jusqu'au premier trait repère, noté $V_1 = 0$ ml ;
- Peser le pycnomètre contenant la solution, noté M_1 en gramme ;
- Introduire une quantité de ciment dans le pycnomètre jusqu'au deuxième trait repère, noté V_2 en ml ;
- Peser à nouveau le pycnomètre contenant la solution et le ciment, noté M_2 en gramme.

On détermine la masse volumique absolue (g/cm^3) à l'aide de la relation 2.7.

$$\rho_{abs} = \frac{M_2 - M_1}{V_2 - V_1} \quad (2.7)$$

2.4 FORMULATION DU MORTIER NORMAL

La méthode de formulation du mortier normal selon la norme NF EN 196-1 est une procédure standardisée permettant de préparer et d'évaluer la résistance mécanique des ciments hydrauliques. Elle fixe des conditions précises de dosage, de malaxage, de moulage et de cure des éprouvettes.

2.4.1 Choix et justification de la méthode

Nous avons choisi d'utiliser cette méthode dans le cadre de notre travail car elle est internationalement reconnue pour son évaluation rigoureuse des performances du ciment en condition normalisée, elle est utilisée pour déterminer la résistance en flexion ou en compression du ciment.

2.4.2 Criblage du sable

Le criblage est une opération essentielle dans la préparation des matériaux pour la confection du mortier. Il s'agit d'un processus de séparation des grains de sable en fonction de leur taille, à l'aide des tamis de différentes mailles. Cette classification granulométrique permet d'obtenir un sable dont les granulats sont repartis en diverses classes granulaires, assurant ainsi une meilleure cohésion et résistance du mortier une fois appliqué.

Le tableau 2-1 illustre les résultats du criblage du sable utilisé pour notre mortier. Les valeurs indiquent la quantité de sable retenue pour chaque tamis utilisé dans le processus, exprimé en grammes :

Tableau 2-1 : Tableau du criblage

NUMERO MODULE DU TAMIS	OUVERTURE	QUANTITE-GRAMME
SABLE GROS		
Tamis 34	2	20g
Tamis 33	1.6	80g
Tamis 32	1.25	225g
Tamis 31	1	125g
SABLE MOYEN		
Tamis 30	0.8	115g
Tamis 29	0.63	115g
Tamis 28	0.5	110g
Tamis 27	0.4	110g
SABLE FIN		
Tamis 26	0.315	75g

Tamis 25	0.25	75g
Tamis 24	0.2	75g
Tamis 23	0.16	75g
Tamis 22	0.125	75g
Tamis 21	0.1	75g

Au total, 1350 grammes de sable lavé et séché ont été répartis entre les différentes classes granulaires, correspondant aux fractions granulométriques retenues par chaque tamis. Cette distribution permet de garantir une granulométrie optimale pour la confection du mortier assurant une bonne performance mécanique et une maniabilité adéquate lors de l'application.

2.4.3 Présentation de la méthode [13]

2.4.3.1 Mortier normal

Le mortier normalisé est un mélange de ciment, sable normalisé et eau, préparé selon les proportions définies de la norme NF EN 196-1 et il est utilisé pour tester les propriétés mécaniques du ciment, notamment la résistance à la flexion et à la compression.

2.4.3.2 Composition du mortier normal

Le mortier normal est composé de 450g de ciment, de 1350g de sable normalisé et de 225g d'eau (le rapport E/C=0,5)

2.4.3.3 Mélange

L'utilisation d'un malaxeur normalisé avec le protocole suivant :

- Introduire le sable et le ciment dans la cuve et mélanger 30s à vitesse lente
- Ajouter progressivement de l'eau et continuer à mélanger 30s à vitesse lente
- Mélanger en suite 30s à vitesse rapide

- Arrêter à 90s soit 1min30s (repos)
- Mélanger encore 60s à vitesse rapide

2.4.3.4 Moulage

Couler le mortier dans des moules de 40x40x160mm en trois couches compactées avec 25 coups de tige ou par vibration normalisée. La figure 2-4 montre les moules prismatiques.



Figure 2-4 : Moules prismatiques

2.4.3.5 Cure

Conservation des éprouvettes 24h en moule à $(20 \pm 1) ^\circ\text{C}$ et $(90 \pm 5) \%$ d'humidité.

2.4.3.6 Démoulage et immersion

Focaliser sur les essais à l'état durci.

2.4.3.7 Essais sur le mortier durci

Ces essais évaluent la résistance mécanique et la durabilité après durcissement

2.4.3.7.1 Résistance à la flexion du mortier

Le principe de cet essai consiste à briser en flexion une éprouvette prismatique 4*4*16 soumise à un charge P tel qu'illustré par la figure 2-5 ci-dessous conformément à la norme (NF EN 196-1 2006).

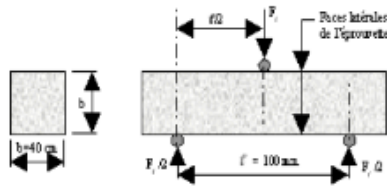


**Figure 2-5 : Epreuve prismatique
soumise à une force appliquée au milieu**

i. Procédure

- Placer le prisme dans un dispositif de flexion avec une face latérale de moulage sur les rouleaux d'appui et son axe longitudinal perpendiculaire à ceux-ci.
- Appliquer la charge verticalement par le rouleau de chargement sur la face latérale opposée du prisme et l'augmenter sans -à-coups à raison de $50\text{N/s} \pm 10\text{N/s}$ jusqu'à rupture.
- Conserver les demi-prismes humides jusqu'au moment des essais en compression

On calcule la résistance à la flexion R_f (en N/mm^2) au moyen de la formule 2.8 :

$$R_f = \frac{1,5 * F_f * I}{b * b * b} \quad (2.8)$$

Avec :

R_f : Résistance à la flexion newtons par millimètre carré

b : Coté de la section carré du prisme en millimètres

F_f : Charge appliquée au milieu du prisme à la rupture en newtons

I : Distance entre les appuis en millimètres

2.4.3.7.2 Résistance à la compression du mortier [3]

- Essayer les demi-prismes en compression sur les faces latérales de moulage.

- Centrer chaque demi-prisme latéralement par rapport aux plateaux de la machine à $\pm 0,5$ mm près et longitudinalement de façon que le bout du prisme soit en porte-à-faux par rapport aux plateaux ou aux plaques auxiliaires d'environ 10mm.
- Augmenter la charge sans à-coups à la vitesse de $2400 \text{ N/s} \pm 200 \text{ N/s}$ durant toute la durée d'application de la charge jusqu'à la rupture
- Quand l'accroissement de charge est réglé manuellement, compenser la décroissance de la vitesse de la charge à l'approche de la rupture.

On calcule la résistance à la compression R_c au moyen de la formule 2.9:

$$R_c = \frac{F_c}{1600} \quad (2.9)$$

Avec :

R_c : Résistance à la compression en newtons par millimètre

b : Côté de la section carrée du prisme en millimètres

F_c : Charge maximale à la rupture en newtons

$1600 = 40\text{mm} \times 40\text{mm}$: Aires des carrés ou des plaques auxiliaires en millimètres carrés

La figure 2-6 illustre les demi-prismes soumis à la compression.

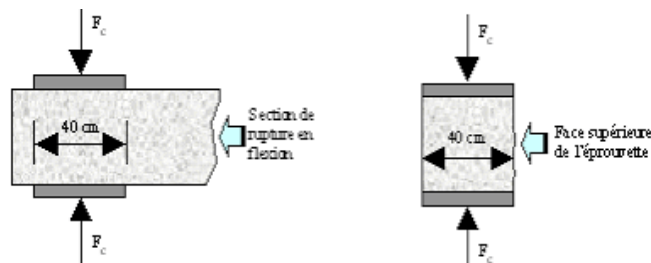


Figure 2-6: prismes soumises à la compression

2.5 PROGRAMME EXPERIMENTAL

Dans cette section, on va présenter la procédure utilisée pour la comparaison de propriétés mécaniques du mortier confectionné à base de sable lavé avec deux variétés de ciments avec deux âges : 7 et 28 jours, le tableau 2-2 présente le programme expérimental.

Tableau 2-2 : programme expérimental

Ciment	Nbre d'éprouvettes	Ages d'essais (Jours)
HIMA	12	7, 28
CIMERWA	12	7, 28

Au total, 24 éprouvettes ont été réalisés dont 12 pour chaque type de ciment.

2.6 CONCLUSION PARTIELLE

Ce chapitre décrit la nature des matériaux utilisés pour notre expérimentation et tous les essais faits sur le ciment et les méthodes utilisés pour y parvenir, le chapitre suivant présentera et analysera les résultats des données obtenues.

Chapitre 3 PRESENTATION ET INTERPRETATION DES RESULTATS

3.1 INTRODUCTION

Ce chapitre présente les différents résultats des essais effectués au laboratoire, entre autre la caractérisation du sable utilisé, la présentation des propriétés physiques du ciment HIMA et CIMERWA et enfin la présentation des leurs propriétés mécaniques évaluées à partir d'un mortier normal.

3.2 CARACTERISTIQUES DU SABLE

Cette partie présente respectivement les résultats issus de l'analyse granulométrique, le module de finesse, le degré de propreté du sable, la masse volumique absolue et apparente.

3.2.1 Analyse granulométrique

L'analyse granulométrique a été effectuée sur un sable de rivière provenant d'IDJWI.

La figure 3-1 présente la courbe granulométrique, obtenue grâce à l'analyse granulométrique.

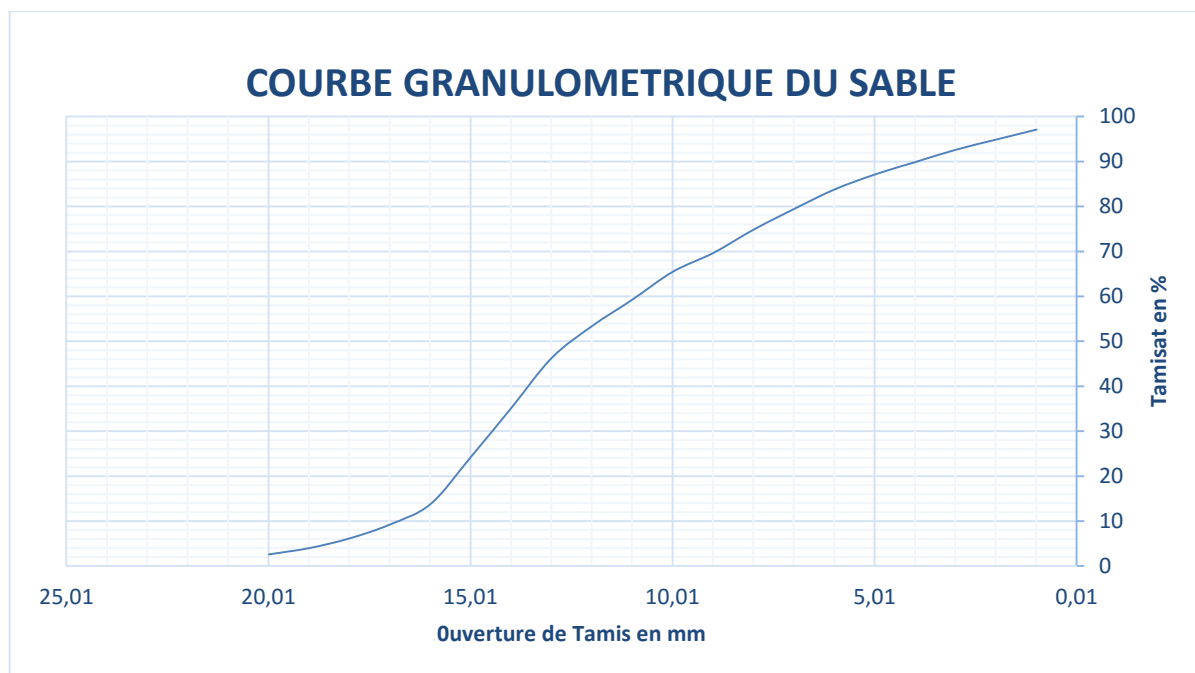


Figure 3-1: Courbe granulométrique

La Figure 3-1, illustre la courbe granulométrique du sable de rivière. L'allure de la courbe granulométrique de ce sable indique celui-ci présente une granulométrie relativement bien répartie, la courbe ayant une allure en S cela veut simplement signifier que le sable n'était ni trop fin ni trop grossier(sable normal).

a. Module de finesse

Le tableau 3-1 reprend la valeur du module de finesse du sable de rivière.

Tableau 3-1 : module de finesse

Désignation	Module de finesse
Sable de rivière	2,393

Avec un module de finesse de 2,393 on peut dire que ce sable est de granulométrie moyenne par ce qu'il se situe entre $2.2 < M_f < 2.8$ qui est la marge acceptable pour un bon module de

finesse. Il n'est ni trop fin ni trop grossier. Ce type de sable est donc bien adapté à une utilisation dans le domaine de la construction, entre autre le béton ou le mortier.

b. Coefficient de courbure et coefficient d'uniformité

Le tableau 3-2 reprend les valeurs du coefficient de courbure et d'uniformité issue de l'analyse granulométrique du sable de rivière.

Tableau 3-2 : coefficient de courbure et coefficient d'uniformité

Désignation	Coefficient de courbure	Coefficient d'uniformité
Sable de rivière	0.15	3.93

Les valeurs des coefficients de courbure et d'uniformité reprises dans le tableau 7 montrent que la distribution granulométrique de ce sable présente une courbure relativement symétrique, et une granulométrie relativement établie vis-à-vis de son coefficient d'uniformité.

3.2.2 Masse volumique du sable

Les valeurs de masse volumique absolue et apparente du sable utilisé sont reprises dans le tableau 3-3.

Tableau 3-3 : masse volumique du sable

Granulats	Masse volumique absolue(g/cm ³)	Masse volumique apparente(g/cm ³)
Sable	2.74	3.28

La masse volumique absolue correspond à la densité réelle des grains de sable, sans tenir compte des vides entre eux, tandis que la masse volumique apparente tient compte des vides présents entre les grains quand le sable est à l'état lâche (non compacté).

L'écart entre la masse volumique absolue et la masse volumique apparente indique que le sable a une structure assez aérée, avec une proportion significative des vides entre les grains

3.2.3 Essai équivalent de sable

Le tableau 3-4 visualise la valeur du degré de propreté du sable.

Tableau 3-4 : équivalent de sable

Désignation	Equivalent de sable en %
Sable de rivière	94.92

Avec un équivalent de sable de 94,92, on peut conclure que le sable de rivière utilisé est extrêmement propre. Cela signifie que qu'il est de très bonne qualité pour une utilisation dans le béton ou dans le mortier, car il ne présente pratiquement pas des fines argileuses.

3.3 PROPRIETES PHYSIQUES DE CIMENTS

Dans cette section, nous allons présenter les résultats issus des essais des prises, des consistances ainsi que ceux des masses volumiques absolues des ciments HIMA et CIMERWA.

3.3.1 Essai de consistance

Le tableau 3-5, présente les résultats de l'essai de consistance effectué sur deux types de ciments : HIMA et CIMERWA. Cet essai vise à déterminer la quantité d'eau nécessaire pour obtenir une pâte de ciment de consistance normal, c'est-à-dire ni trop fluide ni trop sèche.

Tableau 3-5 : valeurs des consistances du ciment HIMA CEMENT et CIMERWA

Désignation	Masse de ciment (g)	Quantité d'eau(ml)	Pourcentage (%)	Observation(mm)
Ciment HIMA CEMENT	500	161	32.2	5
Ciment CIMERWA	500	170	34	5

La figure 3-2, montre les résultats obtenus de la consistance normale de ces deux ciments.

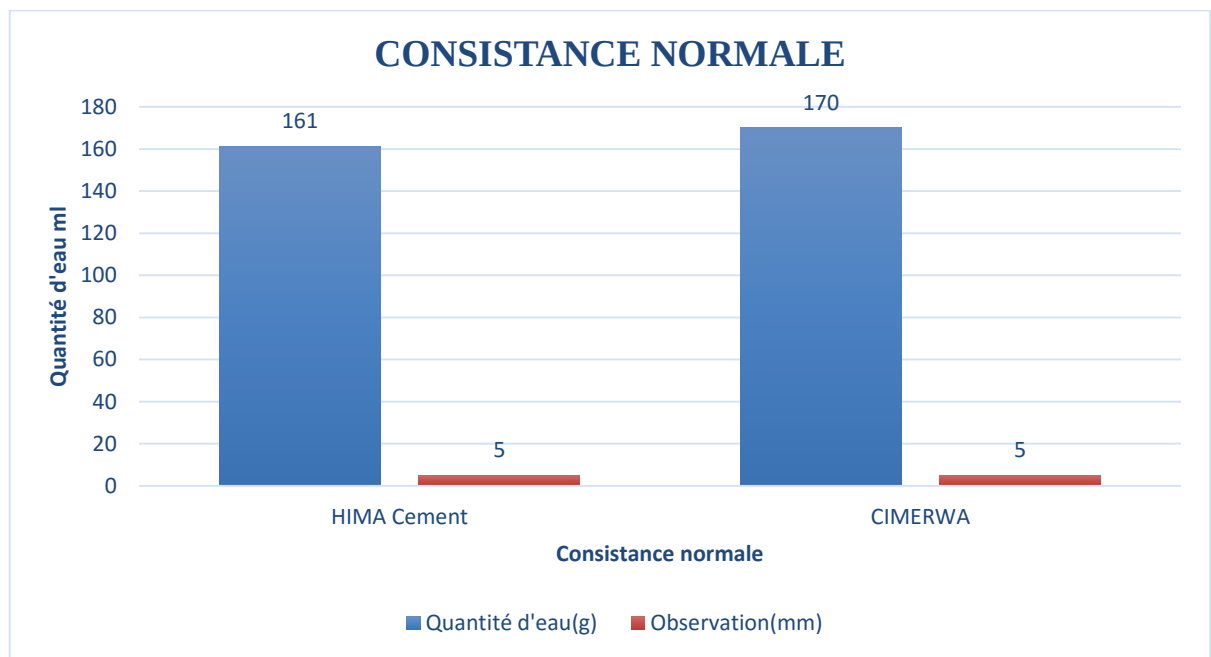


Figure 3-2 : Graphique de la consistance

La figure 3-2, montre que les deux ciments ont des résultats très similaires en termes des consistances normales, néanmoins le ciment CIMERWA nécessite un peu plus d'eau(170ml) que le ciment HIMA (161ml) pour atteindre la même consistance. Cela peut indiquer que le

ciment CIMERWA est légèrement plus fin ou absorbe plus d'eau que le ciment HIMA, la profondeur d'enfoncement (5mm) indique que les deux pâtes sont à consistance normale.

3.3.2 Essai de prise

L'essai de prise permet de déterminer les temps de début et de fin de prise d'un ciment, c'est-à-dire le moment où la pâte commence à se durcir, puis atteint un durcissement suffisant. La figure 3-3, illustre les résultats des temps des prises pour les deux ciments.

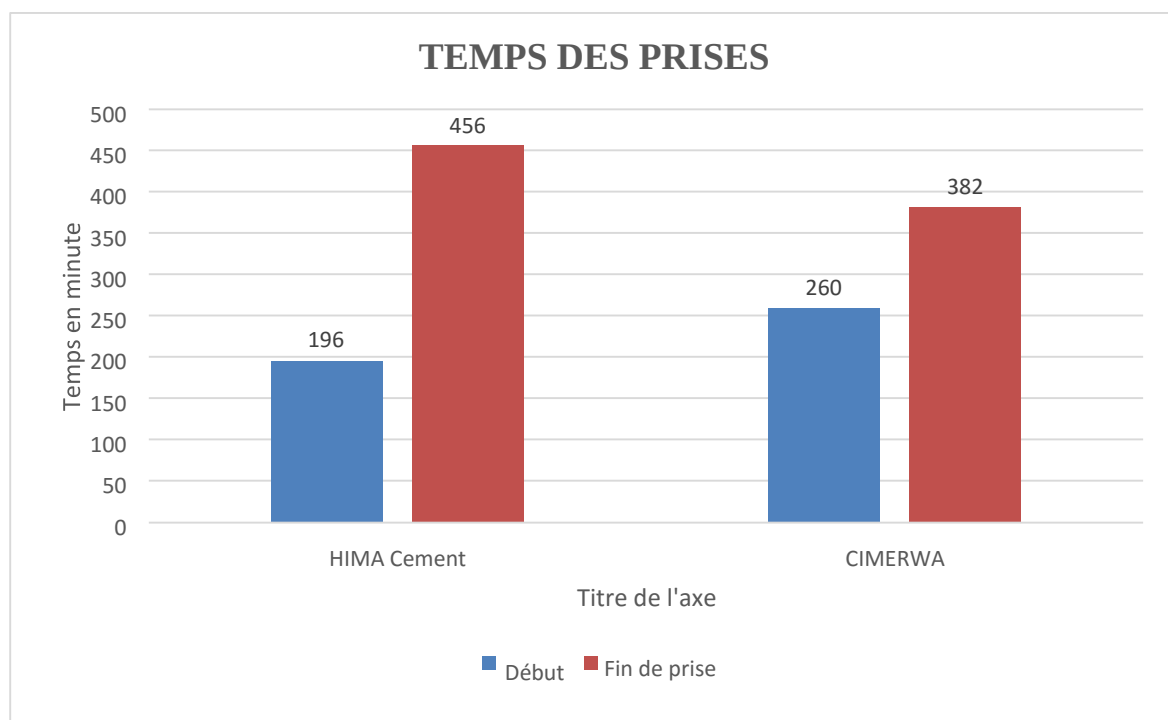


Figure 3-3 : Graphique de temps de prises du ciment HIMA CEMENT et CIMERWA

La figure 3-3, montre que le ciment HIMA commence à faire prise plus rapidement que le ciment CIMERWA, cela signifie que le ciment HIMA a une réaction d'hydratation initiale plus rapide, et pour la fin de prise le ciment HIMA met donc beaucoup plus de temps à durcir complètement, contrairement au ciment CIMERWA qui a une fin de prise plus compacte et plus courte que ce dernier. Dans un climat comme celui de Goma, un ciment à prise rapide peut être avantageux pour des travaux urgents et un ciment à prise plus longue peut être préférable pour les gros ouvrages nécessitant plus de temps de mise en place.

Ces deux ciments présentent des temps de prise conformes aux normes internationales (ASTM/EN). Toutefois, une différence notable est observée : le ciment HIMA débute sa prise plus rapidement mais présente une durée totale de prise plus longue, tandis que le ciment CIMERWA affiche une durée de prise plus courte. Cette différence peut influencer le choix du ciment en fonction des conditions de mise en œuvre et des exigences du chantier.

3.3.3 Masse volumique du ciment

La masse volumique du ciment est une caractéristique physique importante, car elle intervient directement dans le calcul des dosages pour les formulations de béton ou de mortier. Le tableau 3-6 présente les valeurs de la masse volumique de ces deux ciments.

Tableau 3-6 : valeurs des masses volumiques des ciments

Désignation	Masse volumique (g/cm ³)
Ciment HIMA Cement	2,91
Ciment CIMERWA	3,1

Le tableau 3-6, reprend les valeurs obtenues pour la masse volumique du ciment HIMA et le ciment CIMERWA, ces valeurs indiquent que les deux ciments présentent une densité relativement similaire. Cette faible différence de 0.19g/cm³ reste dans les tolérances généralement observées pour les ciments Portland usuels, dont la masse volumique varie typiquement entre 2.9 et 3.15g/cm³.

Le ciment CIMERWA, présente une masse volumique légèrement supérieure, ce qui pourrait indiquer une compacité plus importante des grains ou une teneur légèrement moindre en additif légers. Toutefois, cette différence reste minime et ne permet pas à elle seule de conclure sur la performance globale.

3.4 RESULTAT DE LA FORMULATION DU MORTIER

Cette partie présente les résultats de la formulation du mortier d'étude, qui pour le cas de cette étude, était le mortier normal formulé à base du ciment HIMA Cement et CIMERWA, des classes commerciales de 32.5N.

- **Données**

Pour la préparation de nos mortiers nous avons pris comme dosages ceux du mortier normal, qui est celui que nous utilisons pour cette étude. Ainsi pour chaque gâchée destinée à la fabrication de trois éprouvettes d'essai les quantités suivantes ont été utilisées :

- 450 g de ciment
- 225 g d'eau
- 1350 g de sable, cette quantité a été obtenue après lavage et le criblage du sable pour une bonne répartition granulaire.

3.5 PROPRIETES MECANQUES DE CEMENTS

Dans cette partie, on va présenter les résultats issus de la résistance à la flexion et de la résistance à la compression, effectuer sur le mortier normal formulé à base du ciment HIMA et celui du ciment CIMERWA, à deux âges : 7 et 28 jours.

3.5.1 Caractéristiques des mortiers

Cette partie présente les résultats de la résistance à la flexion et ceux de la résistance à la compression effectuer sur les éprouvettes prismatiques de 40*40*160mm confectionnées pour notre étude, après 7 et 28 jours d'immersion dans l'eau.

3.5.2 Résistance à la flexion

Dans le cadre de cette étude, les essais de flexion ont été effectués sur les éprouvettes prismatiques de dimensions 40x40x160mm confectionnées à base des ciments HIMA et CIMERWA. Ces essais ont été effectués après 7 et 28 jours de cure en immersion dans l'eau conformément aux normes en vigueur. Les résultats obtenus permettent d'évaluer les

performances mécaniques de ces deux types de ciment au fil du temps. La figure 3-4, présente les valeurs de la résistance à la flexion à l'âge de 7 et 28 jours.

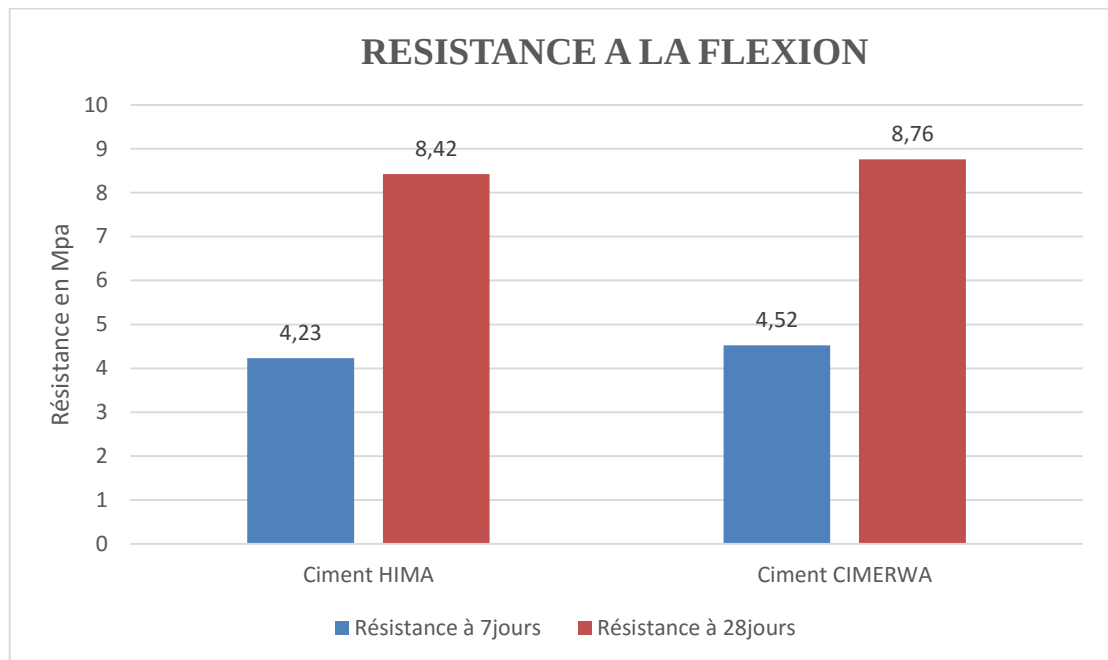


Figure 3-4 : graphique de la résistance à la flexion

La figure 3-4, présente l'évolution des résistances à la flexion pour les ciments HIMA et CIMERWA, mettant en évidence une évolution significative des performances mécaniques entre 7 et 28 jours.

A 7 jours, les ciments CIMERWA et HIMA présentent des résistances proches, respectivement de 4,52MPa et 4,23MPa. Ces valeurs, traduisent un développement normal des résistances à jeune âge, avec une légère supériorité du ciment CIMERWA.

A 28 jours, les résistances à la flexion augmentent de manière significative pour les deux ciments, atteignent 8,76MPa pour le ciment CIMERWA et 8,42MPa pour le ciment HIMA. L'écart observé entre les deux ciments reste toutefois faible, ce qui montre que leurs performances en flexion sont globalement comparables dans les conditions de l'étude. En effet les ciments CIMERWA et HIMA présentent des performances satisfaisantes en résistance à la flexion, conformes aux normes, avec une légère supériorité du ciment CIMERWA

3.5.3 Résistance à la compression

La résistance à la compression constitue l'un des critères fondamentaux dans l'évaluation des performances mécaniques d'un mortier ou d'un béton. Elle permet de déterminer la capacité d'un matériau à supporter des charges sans se rompre, ce qui est essentiel pour garantir la stabilité et la durabilité des ouvrages. Dans le cadre de notre étude, les essais des compressions ont été effectués sur des demis prismes obtenus après l'essai de flexion, ces essais ont été effectués après 7 et 28 jours d'immersion dans l'eau, afin d'analyser l'évolution des résistances dans le temps et de comparer les performances respectives de ces deux types des ciments. La figure 3-5, présente les valeurs de la résistance à la compression à l'âge de 7 et 28 jours.

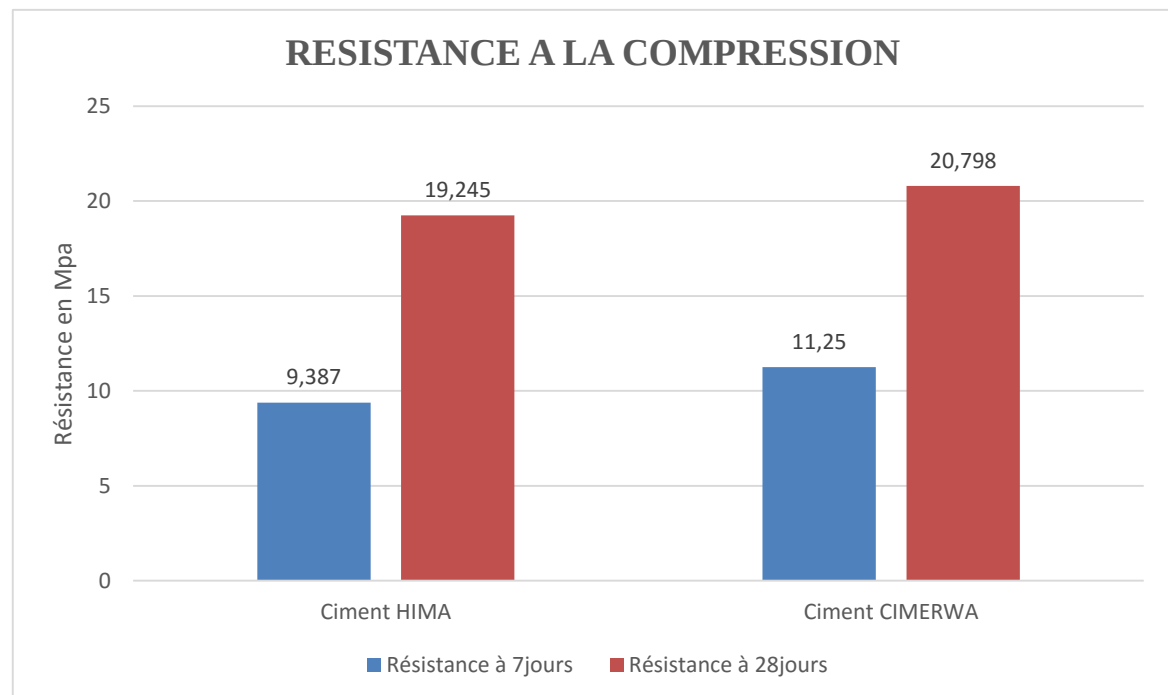


Figure 3-5 : graphique de la résistance à la compression

La figure 3-5, montre l'évolution de la résistance à la compression qui augmente entre 7 et 28 jours pour les deux ciments. Cette évolution est normale car elle est liée au phénomène d'hydratation du ciment, qui provoque la formation progressive des composés responsables de

la résistance du matériau. Ainsi, plus le temps de cure augmente, plus la pâte de ciment se densifie, ce qui améliore la résistance à la compression.

A 7 jours, le ciment CIMERWA présente une résistance à la compression de 11,25 MPa, légèrement supérieur à celle du ciment HIMA qui est de 9,387 MPa. Cette différence indique que le ciment CIMERWA développe une résistance initiale légèrement plus élevée.

A 28 jours, les deux ciments montrent une augmentation significative de la résistance à la compression. Le ciment CIMERWA atteint 20,798 MPa, tandis que le ciment HIMA atteint 19,245 MPa. Bien que la différence reste relativement faible, ces résultats suggèrent que le ciment CIMERWA présente une performance mécanique un peu plus élevée dans les conditions expérimentales de cette étude. On peut conclure que les deux ciments présentent une évolution normale de la résistance à la compression, avec une performance légèrement meilleure pour le ciment CIMERWA.

Selon les résultats de la résistance à la compression montrent que les ciments HIMA et CIMERWA sont tous deux adaptés aux travaux de construction courants. Toutefois, le ciment CIMERWA, présentant des résistances légèrement supérieures, offrant un domaine d'emploi plus large, incluant des ouvrages plus sollicités mécaniquement. En revanche, le ciment HIMA reste approprié pour les travaux de maçonnerie et les constructions à faible charge.

3.6 CONCLUSION PARTIELLE

Ce chapitre a traité trois points principalement, le premier qui était la caractérisation de granulat qui pour notre cas était le sable, le deuxième parlait sur les propriétés physico-mécaniques du ciment HIMA et CIMERWA, la caractérisation du sable a permis de caractériser le sable par le tracé de la courbe granulométrique, de connaître son module de finesse, son coefficient de courbure et d'uniformité, de connaître sa masse volumique apparente et absolue, enfin son degré de propreté. Pour ce qui est des propriétés physico-mécaniques du ciment HIMA et CIMERWA, nous avons vu une différence entre ces deux ciments, du point

de vue consistance, prise, masse volumique absolue, résistance à la flexion et la résistance à la compression.

CONCLUSION GENERALE

Le présent travail avait pour objectif principal d'évaluer les propriétés physico-mécaniques de deux types de ciments couramment utilisés dans la ville de GOMA : le ciment HIMA et le ciment CIMERWA. Cette étude s'inscrit dans une démarche expérimentale visant à fournir aux acteurs du génie civil des données fiables pour un choix judicieux des matériaux de construction adaptés au contexte local.

La méthodologie adoptée a consisté, dans un premier temps, à caractériser le sable pour ensuite l'utiliser dans le mortier qui nous a permis d'évaluer les propriétés mécaniques de ces deux types de ciments : notamment la résistance à la flexion et la résistance à la compression, évaluer à deux âges de 7 et 28 jours. Il a été observé que chaque type de ciment présente des propriétés mécaniques spécifiques qui influencent directement ses performances dans les travaux de construction.

Les résultats de la résistance à la flexion ont montré que le ciment CIMERWA présente une résistance légèrement supérieure de $4,52\text{N/mm}^2$ à 7 jours contre $4,23\text{N/mm}^2$ pour le ciment HIMA, tandis qu'à 28 jours le ciment CIMERWA montre une supériorité globale avec un faible dépassement de $8,76\text{N/mm}^2$ contre $8,42\text{N/mm}^2$ pour le ciment HIMA.

En ce qui concerne la résistance à la compression, le ciment CIMERWA a présenté des performances légèrement supérieures à celles du ciment HIMA, avec des valeurs de $11,25\text{MPa}$ à 7 jours contre $9,387\text{MPa}$, et de $20,798$ à 28 jours contre $19,245\text{MPa}$. Cette tendance indique une meilleure capacité du ciment CIMERWA à développer des résistances mécaniques, bien que l'écart observé reste modéré.

Pour ce qui est, des propriétés physiques, nous avons eu à évaluer trois propriétés : la masse volumique absolue, la consistance et la prise (temps de début et fin de prise). Les résultats de la consistance ont révélé que le ciment CIMREWA nécessitait un peu plus d'eau pour atteindre la même consistance que le ciment HIMA qui était de 5mm à 32.2% contre 34% pour le ciment CIMERWA, de même l'essai de prise a montré que le ciment CIMERWA durci vite que le

ciment HIMA avec une masse volumique de 2.91g/cm^3 contre 3.1g/cm^3 pour le ciment CIMERWA.

En somme, cette étude contribue à une meilleure connaissance des matériaux locaux et encourage une approche plus scientifique dans le choix de ciments utilisés dans les projets de construction locale. Il serait pertinent, pour les futures études, d'étendre cette évaluation à d'autres types de ciments disponible sur le marché Gomatrancien.

Bibliographie

- [1] A. M. Neville, «Properties of concrete,» 2012.
- [2] A. C150/C150M, «Standard specification for portland Cement,» 2022.
- [3] C. M. M. Grace, Support de cours de Physique et technologie du béton, GOMA, 2023-2024.
- [4] CIMBETON, la norme française des ciment, centre d'informations sur le ciment et les applications, édition 2001.
- [5] UNIVERSITE ABOUBEKR BELKAID, Science des matériaux de construction, 2005-2006.
- [6] Z. M. Landrine, Caractérisation du béton à base de granulats de BWEREMANA, GOMA, 2022-2023.
- [7] D. T. BOUBEKEUR, matériaux de construction, Algérie, 2007.
- [8] Dreux. G. & Festa, guide des constituants des mortiers.
- [9] Les mortiers DOCUMENT.
- [10] C. S. e. T. d. Batiment), Les mortiers de bâtiment, guide de mise en oeuvre, dosages pratiques pour maçonnerie, enduits, jointes et chapes..
- [11] Y. BAHATI KAHASHI, Etude comparative des Bétons autoplacants formulés à partir de la méthode de Dreux-Gorisse et celle de Bolomey, GOMA, 2021.
- [12] C. M. M. Grace, Cours de laboratoire des matériaux, Goma, 2023-2024.
- [13] T. E. 9. P. L. D. C. AFNOR, NF EN 196-1, AOUT 1995..
- [14] D. G. e. F. Festa, Guide des constituants du mortier, Edition Eyrolles.

ANNEXES

ANNEXE 1 : ESSAIS SUR LE SABLE

1.Composition granulométrique du sable

N° TAMIS		OUVERTURE (mm)		Refus partiels	Refus cumulés		Tamisât
ASTM	AFNOR	ASTM	AFNOR	G	(g)	%	%
1/4''	39	6.35	6.3	86	86	2,86	97,13
3/16''	38	4.76	5	67	153	5,1	94,9
5	37	4	4	68	221	7,36	92,63
6	36	3.36	3.15	82	303	10,1	89,9
8	35	2.38	2.5	83	386	12,86	87,13
10	34	2	2	100	486	16,2	83,8
12	33	1.68	1.6	130	616	20,53	79,46
16	32	1.19	1.25	138	754	25,13	74,86
18	31	1	1	156	910	30,33	69,66
20	30	0.84	0.8	125	1035	34,5	65,5
30	29	0.59	0.63	186	1221	40,7	59,3
35	28	0.5	0.5	177	1398	46,6	53,4
40	27	0.4	0.4	213	1611	53,7	46,3
50	26	0.315	0.315	334	1945	64,83	35,16
60	25	0.25	0.25	327	2272	75,73	24,26
70	24	0.2	0.2	315	2587	86,23	13,76
100	23	0.16	0.16	136	2723	90,76	9,23
120	22	0.125	0.125	93	2816	93,86	6,13
140	21	0.1	0.1	65	2881	96,03	3,96
200	20	0.08	0.08	42	2923	97,43	2,56

2.Équivalent de sable

Désignation		Eprouvette 1	Eprouvette 2	Moyenne en %
Lecture visuelle	H ₁ (cm)	9.5	9.7	
	H ₂ (cm)	10.3	10.2	
Lecture à piston	H ₁ ' (cm)	8.92	9.55	
ESV (%)		92.23	95.1	-
ESP (%)		93.89	98.45	-
ES(%)		93.06	96.77	94.92

3.Masse volumique apparente du sable

Echantillon	Masse d'échantillon (g)	Masse de la moule (g)	Volume de la moule (cm ³)	ρ (g/cm ³)
Echantillon 1	10079	5393	3083.2	3.26
Echantillon 2	10188	5393	3083.2	3.30
Echantillon 3	10119	5393	3083.2	3.28
Moyenne ρ (g/cm ³)				3.28

4.Masse volumique absolue du sable

MASSE VOLUMIQUE ABSOLUE				
1. SABLE				
ESSAI 1	Masse sèche(g)	150	ρ1	2.78
	V1(ml)	90		
	V2(ml)	144		
ESSAI 2	Masse sèche(g)	500	ρ2	2,78
	V1(ml)	600		
	V2(ml)	780		
ESSAI 3	Masse sèche(g)	800	ρ3	2,67
	V1(ml)	1000		
	V2(ml)	1300		
				MOYENNE
				2.74g /cm³

ANNEXE 2 : ESSAIS SUR LE CIMENT

1. Valeurs des consistances du ciment HIMA Cement et CIMERWA

Désignation	Masse de ciment (g)	Quantité d'eau(ml)	Pourcentage (%)	Observation(mm)
Ciment HIMA Cement	500	161	32.2	5
Ciment KABIMBA	500	170	34	5

2. Valeurs du début et fin de prise du ciment HIMA Cement et CIMERWA

Désignation	Temps de début de prise(minutes)	Temps de fin de prise(minutes)
Ciment HIMA Cement	196	456
Ciment CIMERWA	260	382

3. Valeurs des masses volumiques des ciments

Désignation	Masse volumique (g/cm ³)
Ciment HIMA Cement	2,91
Ciment CIMERWA	3,1

4. Valeurs des résistances à la flexion(N/mm²) à 7 et 28jours

Ages (jours)	Ciment HIMA	Ciment CIMERWA
7	4,23	4,52
28	8,42	8,76

5. Valeurs des résistances à la compression(Mpa) à 7 et 28jours

Ages (jours)	Ciment HIMA	Ciment CIMERWA
7	9,387	11,25
28	19,245	20,798