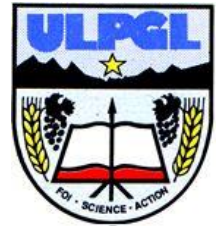


UNIVERSITE LIBRE DES PAYS DES GRANDS LACS

(ULPGL-Goma)

www.ulpgl.net



Faculté des Sciences et Technologies Appliquées

**DU LIANT ECOLOGIQUE PAR AJOUT DES CENDRES DE
BAGASSE DE CANNE A SUCRE**

Etude de l'influence sur les propriétés mécaniques du mortier et du béton

Mémoire pour l'obtention du

Diplôme d'Ingénieur Civil

Option : **STRUCTURES ET OUVRAGES D'ART**

Présenté et soutenu publiquement en Octobre 2019 par :

HAMULI CIDORHO Crépin

Travail dirigé par :

Professeur François NGAPGUE

Sous l'encadrement de :

Assistant Ingénieur David MUGANZA

Promotion 2018 - 2019

EPIGRAPHE

“

Expliquer toute la nature est une tâche trop ardue pour un seul homme ou une seule époque. Il est plus sage de faire peu en étant sûr de soi et laisser le reste à ceux qui viendront après, que présumer de tout sans être sûr de rien.

”

Isaac NEWTON

DEDICACE

Spécialement à mon Père, Monsieur **Deo HAMULI T.J.A.**

REMERCIEMENT

Le travail présenté dans ce mémoire a été réalisé aux Laboratoires de Géotechnique de l'Université Libre des Pays des Grands Lacs à Goma et de la cimenterie du Kivu (CIMENKI) à Katana.

Nous tenons à exprimer nos sincères remerciements au Professeur François NGAPGUE pour la direction de ce mémoire, à l'Assistant Ingénieur David MUGANZA pour son encadrement. Leur expérience, leur expertise et leurs capacités à soulever des contradictions ont été une aide précieuse à l'avancée de ce travail.

Une collaboration a notamment permis l'aboutissement de ce projet, celle avec le laboratoire de la Cimenterie du Kivu, rendue possible grâce à l'investissement des autorités de la Faculté des Sciences et Technologies Appliquées de l'ULPGL Goma que nous remercions en passant. Nous tenons à remercier Monsieur Jean Jacques BASHWIRA, le Directeur de la CIMENKI pour son accord et l'accès au laboratoire.

Nous voudrions ici aussi prendre le temps de dire merci à la grande famille HAMULI, notre soupape sûreté, qui nous a toujours soutenu durant nos années d'études. Nous remercions notre père, Deo HAMULI, notre idole de qui nous nous sommes inspirés pour nous orienter dans cette noble carrière d'ingénieur civil. Merci à ma maman Speciose MUZALIWA, au grand frère et grandes sœurs, au cadet Calvin HAMULI.

Nous remercions notre oncle Jean de Dieu ITEGWA et la famille Pascal BASEME pour leur appuis et apports, ils ont considérablement contribué à notre formation.

Un grand merci à tous nos amis avec lesquels nous avons passé nos moments de lutte académique et d'échanges scientifiques et de jeunesse ; Merci à Oscar FATAKI, Achille BAZIKANGE, Justin AMANI, Justin ZABONA, DITO Franklin.

Un travail de fin d'études n'est pas seulement une histoire de personnes ; nous exprimons notre gratitude au Groupe GESI-Technologies grâce auquel nous avons appris les logiciels de génie civil et qui m'a permis de m'ouvrir au monde extérieur.

Que celles et ceux qui n'ont pas été cités, trouvent dans ce travail l'expression de notre profonde gratitude.

RESUME

Plus que jamais, le besoin croissant de nouvelles infrastructures dans le monde exige la construction de bâtiments économiques et durables, nécessitant une production minimale de gaz qui impactent négativement sur le climat dans leur production. Les matériaux de construction « écologiques » fabriqués à partir de ciments mélangés présentent des avantages par rapport au ciment Portland ordinaire car ils sont moins chers, génèrent moins de dioxyde de carbone et sont plus durables.

Avec pour objectif principal de constituer un matériau écologique et économique, nous avons étudié un mélange dans lequel le ciment est remplacé par de la cendre de résidus de canne à sucre (bagasse) provenant de déchets agricoles, en raison de différentes proportions allant de 0 à 20% en vue d'obtenir un matériau écologique c'est-à-dire dont les procédés de production réduisent la production des gaz à effets de serres.

De par la méthode de substitution, nous voulons faire varier la proportion des cendres de bagasse dans le ciment (remplacement partiel du ciment par la cendre) afin d'étudier son effet sur les propriétés physico-chimiques du ciment confectionné et le comportement mécanique du mortier et du béton.

Les résultats trouvés démontrent que si la cendre a été bien traitée, son addition au ciment accroît les résistances mécaniques du mortier et du béton, et cela jusqu'à une substitution de 10% en masse des cendres. A deux jours, nous trouvons que l'ajout de la cendre dans le ciment ne varie pas les propriétés du mortier ou ne varie que très peu. C'est plutôt à partir de 7 jours et au-delà que ses effets sont remarquables.

Au vu de ces résultats, il se trouve évident que l'incorporation des cendres de bagasse de canne à sucre permettent d'obtenir un matériau écologique contribuant à la réduction de la production des gaz à effet des serres produits lors de la fabrication des ciments, ce qui participe et contribue activement à la lutte pour la protection de l'écosystème.

ABSTRACT

More than ever before, the growing need for new infrastructures in the world requires economic and sustainable buildings, asking for minimal gas production that negatively impacts the climate in their production. "Greener" building materials made from blended cements have advantages over the ordinary Portland cement because they are cheaper, generate less dioxide carbon and are more durable.

With the main objective of being an ecological and economical material, we studied a mixture in which the cement is replaced by ashes of sugarcane residues (bagasse) coming from agricultural waste, from different proportions ranging from 0 to 20% to obtain an ecological material whose production processes reduces the production of greenhouse gases.

By the substitution method, we want to vary the proportion of bagasse ash in the cement (partial replacement of the cement by the ash) in order to study its effect on the physicochemical properties of the cement made and the mechanical behavior of the mortar and concrete.

The results found demonstrate that if the ash was well treated, its addition to cement would increase the mechanical strength of the mortar and concrete, and that up to a substitution of 10% by mass of ash. At two days, we find that the addition of ash in the cement does not vary the properties of the mortar or varies only very little. It is rather from 7 days and beyond that its effects are remarkable.

In view of these results, it is evident that the incorporation of sugarcane bagasse ashes makes it possible to obtain an ecological material contributing to the reduction of greenhouse gas production produced during the manufacture of cements, which participates and actively contributes to the fight for the ecosystem protection.

SOMMAIRE

DEDICACE	i
REMERCIEMENT	iii
RESUME	iv
ABSTRACT.....	v
SOMMAIRE.....	vi
LISTE DES TABLEAUX.....	vii
LISTE DES FIGURES	viii
SIGGLES ET ABBREVIATIONS	ix
INTRODUCTION GENERALE	1
CHAP I. APPROCHE ENVIRONNEMENTALE	3
I.1. LE GENIE CIVIL FACE AUX ENJEUX DU DEVELOPPEMENT DURABLE.....	3
I.2. NOTION DE MATERIAU ECOLOGIQUE « ECO-MATERIAU »	4
I.3. NOTIONS DES MATERIAUX BIOSOURCES	5
I.4. ENVIRONNEMENT ET ECONOMIE DE LA CANNE A SUCRE	6
I.5. LE CIMENT	10
Chapitre II. APPROCHE METHODOLOGIQUE	15
II.1. DESCRIPTION DES MATERIAUX	15
II.1.1. Obtention de la cendre de bagasse	15
II.1.2. Les liants	16
II.1.3. Les granulats	16
II.2. FORMULATION DU BETON : Méthode des abaques de DREUX-GORISSE.....	16
II. 3. ESSAIS SUR LES MATÉRIAUX.....	23
II.3.1. NORMES	24
II.3.2. Obtention du sable normalisé par criblage	24
II.3.3. Confection du mortier normal	25
II.3.4. Différents essais sur mortier.....	28
II.3.4. Formulation du béton	30
II.3.2. Essais sur le béton	32
II. 2. 3. Le béton frais.....	32
II. 2. 4. Le béton durci.....	32
CHAPITRE III. RESULTATS ET DISCUSSION.....	33
III.I. RESULTATS.....	33
III.1.1. Résultats sur éprouvettes de mortier	36
III.1.2. Résultat sur le béton.....	37

III.5 DISCUSSION DES RESULTATS	38
CONCLUSION GENERALE.....	42
BIBLIOGRAPHIE.....	43
ANNEXES.....	a

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Synthèse des propriétés attendues d'un éco-matériau	4
Tableau 2 : Valeurs moyennes de saccharose, de sucres réducteurs et de fibres du complexe Saccharum	6
Tableau 3 : Origine des fibres végétales naturelles [4]	9
Tableau 4. Composition botanique de quelques fibres végétales [4]	10
Tableau 5. Composition chimique des ciments Portland [Taylor, 1997].....	12
Tableau 6. Classes de résistance à la compression des ciments courants [7].....	13
Tableau 7: Différents types de ciments courants normalisés [7]	13
Tableau 8 : Coefficient granulaire K_{DG} , méthode Dreux-Gorisse	18
Tableau 9: Évaluation de l'ouvrabilité par référence à l'affaissement au cône [1].....	18
Tableau 10: Dénomination des affaissements selon la norme EN 206-1 en mm	18
Tableau 11: Correction en pourcentage d'eau en fonction de la dimension des plus gros granulats	19
Tableau 12: Valeur du terme correcteur K en fonction du dosage en ciment, de la puissance de la vibration et de l'angularité des granulats [7].....	21
Tableau 13 : Valeur du coefficient de compacité γ	23
Tableau 14 : composition granulométrique du sable normalisé.....	25
Tableau 16 : Opérations de malaxage du mortier normal.	26
Tableau 17 : Formulation des pâtes de ciment	27
Tableau 18 : Formulation des mortiers	28
Tableau 19 : Formulation des bétons suivant les proportions de cendres	31
Tableau 15 : Résultats du sable normalisé	34
Tableau 23 : Résultat de compression et flexion des mortiers préparés	36
Tableau 24 : Effet de l'ajout de la cendre sur la résistance à la compression.....	37

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Portion souterraine d'un pied de canne montrant les tiges (Martin, 1938).....	7
Figure 2 : Aspect des cendres après broyage	15
Figure 3 : ciment TWIGA 42.5 B/L.....	j
Figure 4 : Estimation du dosage en ciment C	19
Figure 5: Schéma de principe de la courbe granulaire de référence.	20
Figure 6 : Utilisation de la courbe granulaire de référence.....	22
Figure 7 Appareil à choc avec moules prismatiques du laboratoire de la CIMENKI	27
Figure 8: Dispositif pour l'essai de résistance à la flexion.....	28
Figure 9: Dispositif de rupture en compression	29
Figure 10 : Machine d'essais de résistance à la flexion	29
Figure 11: Machine d'essais à la compression	30
Figure 12 : Courbe granulométrique du sable lavé 0/5	33
Figure 13 Courbe granulométrique de concassés 5/15	35
Figure 14 : courbe granulométrique des concassées 15/25.....	35
Figure 15: Effet des cendres sur la résistance du mortier à la flexion	38
Figure 16: Effet de pouzzolane sur la résistance du mortier à la compression.....	39
Figure 17 : Effet de la cendre sur la résistance du béton à la compression	40

SIGGLES ET ABBREVIATIONS

FDES : Fiche de Déclaration Environnementale et Sanitaire

AG : analyse granulométrique

C : dosage en ciment

cm : centimètre

E : proportion eau

E/C : rapport eau sur ciment

ES : équivalent de sable

fc28 : résistance caractéristique du béton à 28 jours

G : proportion gravier

kN : kilo newton

Mf : module de finesse

MPa : méga pascal

N : Newton

S : proportion sable

ρ : masse volumique

INTRODUCTION GENERALE

Dans la plupart des pays fortement industrialisés, le début de XXIème siècle a été marqué par une prise de conscience généralisée concernant la nécessité de limiter les impacts de l'activité humaine sur l'environnement. Le domaine des constructions où le ciment est le matériau utilisé, sa production contribue plus à la destruction de l'écosystème à grande échelle avec pour conséquence principale la génération des émissions des gaz à effets de serres. Ce liant associé pourtant aux matériaux fibrés tel le chanvre, le lin, le sisal, la cendre de la bagasse de la canne à sucre posséderait tous les avantages que requiert un matériau écologique de construction pour faire face aux enjeux climatiques, environnementaux et écologiques de toute structure [1].

En République Démocratique du Congo, d'après les statistiques de la sucrerie de Kiliba au Sud-Kivu, environ 400 000 tonnes de cannes sont récoltées chaque année. Sachant que la bagasse représente environ 30% du poids de la canne à sucre (120 000 tonnes) et que le rendement de calcination de la bagasse est de 6 %, la production annuelle de cendres serait de 7200 tonnes. Cette bagasse est le plus souvent utilisée comme engrais et surtout comme combustible pourtant très riche en fibres. Comme combustible elle aura pour effet la production du carbone qui a un impact dommageable lorsqu'il est accumulé dans les structures, ce qui réduirait considérablement la durée de vie de cette dernière. La durabilité d'une construction dépend de l'environnement dans lequel elle est exposée, Celle-ci diminue lorsque la construction est non seulement exposée à un milieu agressif (l'effet que causerait les fumées produites lors de la calcination des bagasses utilisées comme combustibles) mais encore si le bon choix des matériaux n'a pas été pris en compte.

Ainsi, différentes questions ont motivé notre curiosité scientifique dans cette étude :

Pourquoi substituer une partie du ciment en cendres de bagasse de canne à sucre ?

Quel effet aurait-elle sur la classe de résistance du ciment et sur la résistance à la compression du béton ?

Au lieu de son élimination comme déchet, l'utilisation de la cendre de bagasse comme addition pouzzolanique dans le ciment conduirait à des bénéfices directs au plan économique et environnemental. De plus, la présence de matière végétale, aurait pour conséquence de diminuer la quantité de ciment utilisée et d'incorporer plus de matière

végétale, de nature à permettre une économie de CO₂ par la suite une diminution de la production du gaz à effet de serre.

Ensuite, la présence de la cendre de bagasse dans le ciment réduirait la chaleur d'hydratation, ce qui réduit le risque de fissuration du béton. Également son taux d'absorption élevé réduirait considérablement le risque d'émiettement du béton mais encore, à long, terme le taux de corrosion des armatures pour le cas du béton armé. Cela s'expliquerait par le fait que plus l'eau se déplace rapidement plus le béton serait susceptible d'émiettement ; par contre, plus l'eau se déplacera lentement, plus le ciment serait compact donc susceptible de produire du béton solide car il mettra du temps à sécher complètement. Au début, le béton à partir de ciment ordinaire seul apparaîtra plus dur, mais à mesure que le béton sèchera, celui qui est élaboré avec 10% de cendres de canne apparaîtra de plus en plus solide et résistant.

L'objectif principal de ce travail est d'arriver à confection un mortier et un béton pour lesquels une partie du ciment est substitué cendres de bagasse dans le but d'étudier l'influence de la présence de ces cendres sur les propriétés mécaniques du ciment et du béton.

Les objectifs spécifiques de notre étude sont :

- Premièrement de valoriser la cendre de bagasse de la canne à sucre, une ressource disponible généralement utilisée comme combustible et comme engrais.
- Ensuite d'incorporer cette ressource dans le ciment suivant une proportion bien définie dans le but d'étudier l'influence de cet ajout sur les propriétés mécaniques du mortier et du béton.
- Tertio, arriver à obtenir un matériau écologique et économique qui répondra aux exigences de construction durables et respectueuses de l'environnement.

Pour atteindre ces objectifs, nous subdiviserons ce travail en trois branches dont :

1. L'approche environnementale qui décrit les différents matériaux faisant l'objet de ce mémoire tout en décortiquant leur influence sur l'environnement.
2. L'approche analytique et expérimentale qui décrit les analyses et essais qui faits au laboratoire de Génie Civil de l'ULPGL Goma et de la Cimenterie de Katana au Sud Kivu.
3. Et la dernière traite des résultats et discussions de nos expérimentations.

Notons par ailleurs que nous utiliserons différentes méthodes de travail entre autres la documentation et la méthode de substitution dans les différentes formulations.

Chapitre I. APPROCHE ENVIRONNEMENTALE

Dans ce chapitre, nous nous proposons de faire un aperçu sur les enjeux du développement durable en Génie Civil ensuite nous définirons la notion d'éco-matériaux (matériau écologique) et matériaux biosourcés faisant objet de notre étude, des matériaux de construction émergents qui répondent aux nouvelles attentes des utilisateurs et de l'environnement, enfin nous aborderons à la suite la caractérisation des différents matériaux qui entrent dans jeu dans la suite de notre travail : la bagasse de la canne à sucre et le liant (ciment).

I.1. LE GENIE CIVIL FACE AUX ENJEUX DU DEVELOPPEMENT DURABLE

Nous assistons depuis quelques dizaines d'années à une prise de conscience de la part des pouvoirs publics, des acteurs économiques et de la société civile, des conséquences défavorables des activités humaines sur l'environnement et de la nécessité de réduire, de manière urgente, ces impacts. C'est pourquoi, aujourd'hui, à l'échelle internationale, dans les domaines de l'industrie, de l'énergie, des transports, de la construction, les incitations et les contraintes sont de plus en plus fortes pour intégrer les projets à une démarche de développement durable.

La définition la plus répandue du développement durable est celle donnée en 1987 dans le rapport Brundtland selon laquelle « le développement durable est un mode de développement qui répond aux besoins des générations du présent sans compromettre la capacité des générations futures à répondre aux leurs ». [2]

Or, aujourd'hui, la capacité des générations futures à subvenir à leurs besoins est menacée. Nous nous trouvons dans une situation critique à plusieurs titres, les plus parlants étant peut-être :

- La menace d'un réchauffement climatique, identifié aujourd'hui, par la majorité des scientifiques, comme une conséquence du rejet en quantité importante de gaz à effet de serre (CO₂, CH₄ etc.) par les activités humaines ;
- La raréfaction des ressources naturelles dont certaines apparaissent pourtant à l'heure actuelle indispensables au fonctionnement de nos sociétés (pétrole, gaz etc.).

Cette prise de conscience au niveau international a conduit à l'organisation en juin 1992 de la Conférence des Nations Unies sur l'Environnement et le Développement (CNUED) à Rio

de Janeiro (Brésil) puis, à l'adoption, cinq ans plus tard, du protocole de Kyoto par les représentants de 160 pays. Trente-huit pays industrialisés se sont ainsi engagés à réduire globalement entre 2008 et 2012 leurs émissions de gaz à effet de serre (GES) de 5.2% par rapport au niveau de 1990. [3]

1.2. NOTION DE MATERIAU ECOLOGIQUE « ECO-MATERIAU »

2.1. Définition

L'éco-matériau doit permettre de répondre aux critères de l'éco-conception, c'est-à-dire :

- ✓ Limiter les impacts environnementaux durant tout son cycle de vie
- ✓ Procurer les conditions de confort aux occupants du bâtiment pendant son exploitation,
- ✓ Ne pas présenter de danger pour la santé tant pendant la phase de mise en œuvre que celle de l'utilisation du bâtiment.

Les propriétés du matériau, caractéristiques de ces différents critères, sont détaillées dans le Tableau 1.

Tableau 1. Synthèse des propriétés attendues d'un éco-matériau

Qualité	Effets recherchés
Faible coefficient de conductivité thermique lambda	Freiner l'échange de chaleur entre l'intérieur et l'extérieur
Forte densité Bonne aptitude à accumuler la chaleur (chaleur spécifique)	Amortir l'onde de variation de la température extérieure sur le cycle de 24 heures Retarder la propagation du feu en cas d'incendie Offrir une bonne isolation phonique.
Perméabilité à la vapeur d'eau	Permet de laisser respirer la maison
Longévité	Absence de tassement, pas d'apparition de "jours" aux raccords
Absence de nocivité	Pas d'émanation toxique due à des additifs chimiques, pas de microfibres irritantes.
Isolation préservée en cas d'humidité	Efficacité préservée de l'isolant par grand froid.

Il n'existe cependant pas, à l'heure actuelle, de label ou de norme permettant de qualifier suivant des critères objectifs un matériau « d'éco-matériau ». Seules les Fiches de Déclaration Environnementale et Sanitaire (FDES) proposent une synthèse des propriétés environnementales des matériaux de la construction mais la constitution et la diffusion de ces fiches reposent uniquement sur le volontariat. Dans nos travaux, nous désignerons donc comme tel, un matériau dont la formulation et/ou les propriétés permettent d'atteindre plusieurs des objectifs de l'éco conception.

Il est entendu que le matériau parfait n'existe pas, et qu'il est impossible de répondre de manière optimale à tous ces critères. Cependant, on peut dire qu'à l'heure actuelle, bon nombre de matériaux conventionnellement utilisés en construction sacrifient l'impact environnemental ou sanitaire à des objectifs de coût et de facilité de mise en œuvre.

Les propriétés ne doivent pas non plus être isolées les unes des autres, comme c'est parfois le cas aujourd'hui dans le cadre de techniques marketings qui identifient un facteur favorable et le mettent en avant en le séparant des autres.

Ainsi, une démarche constructive basée sur des matériaux éco (conçus) est en plein développement face à la remise en question des modes de construction conventionnels à base de béton, de matériaux isolants d'origine pétrolière, de briques très énergivores ou encore nécessitant l'utilisation de colles ou de solvants, responsables de l'émission de composants nocifs pour la santé et l'environnement. Les éco-matériaux employés, encore peu diffusés, sont de préférence fabriqués à partir de ressources renouvelables et/ou locales tel le cas de la bagasse, et ils permettraient, grâce à leurs propriétés physiques, de créer des habitats sains, consommant peu d'énergie, aux confort thermique, hygroscopique et acoustique élevée et dont la destruction ne générerait pas de déchets difficiles à stocker. [3]

I.3. NOTIONS DES MATERIAUX BIOSOURCES

L'arrêté du 19 Décembre 2012 définit une matière biosourcée comme étant une matière issue de la biomasse végétale ou animale et pouvant être utilisée comme matière première. [4]

Un produit de construction est dit « biosourcé » s'il est totalement ou partiellement biosourcé, c'est-à-dire fait d'une matière d'origine biologique à l'exception des matières premières de formation géologique ou fossile. Ces matériaux présentent deux atouts environnementaux principaux ; d'abord la matière dont ils sont issus est renouvelable, ensuite ils peuvent

contribuer à la réduction des émissions de gaz à effet de serre et au stockage temporaire de carbone. Toutefois, certains freins demeurent pour leur utilisation totale dans le domaine du bâtiment. De manière non exhaustive, il y a un déficit de structuration du domaine biosourcé, le tissu industriel n'est composé que de petites et très petites entreprises aux capacités de développement limitées, la réglementation et le corpus normatif est difficile à comprendre et à gérer par les entrepreneurs de la construction, il existe un certain manque de (re)connaissance des matériaux biosourcés par les professionnels, et enfin il y a pour sûr un déficit de formation des acteurs à tous les niveaux de qualification.

Comme exemple de matériau biosourcé on s'intéressera plus particulièrement aux liants biosourcés. En plus de leur fonction structurelle, ces derniers doivent assurer une fonction thermique (isolation) et acoustique (réduction du niveau de bruit transmis). On citera le ciment écologique fait de cendres de bagasse de canne à sucre.

I.4. ENVIRONNEMENT ET ECONOMIE DE LA CANNE A SUCRE

I.4.1. Origine et botanique

La canne à sucre est une graminée originaire de Nouvelle Guinée et des îles proches. La migration de la canne à sucre à travers l'Asie, la Mélanésie, le Moyen Orient et l'Afrique du nord s'est accompagnée d'un fort processus d'hybridation et de sélection variétale. Au plan taxonomique, l'appellation « canne à sucre » recouvre en réalité un complexe constitué de plusieurs espèces et de leurs hybrides dont les principales sont données en Tableau 2. [4]

Tableau 2 : Valeurs moyennes de saccharose, de sucres réducteurs et de fibres du complexe Saccharum

Genres et espèces	Nombre de colonnes	Taux moyen de saccharose, %f	Teneur moyenne en sucres, %f	Taux moyen de fibres, %f
<i>S. officinarum</i>	25	17,48 ± 0,35	0,32 ± 0,02	9,8 ± 0,4
<i>S. spontaneum</i>	30	5,35 ± 0,38	1,66 ± 0,06	31,8 ± 0,9
<i>S. robustum</i>	10	7,73 ± 0,83	0,27 ± 0,02	24,8 ± 1,6
<i>S. sinense</i>	2	13,45 ± 0,02	0,38 ± 0,08	12,8 ± 2,0

La botanique de la canne à sucre décrit les principaux éléments tige, bourgeon, feuille et racine. La matière utilisée pour cette étude est essentiellement issue des tiges de canne à

sucre. Elle est décrite par la suite, d'un point de vue morphologique et anatomique. Une telle approche de la canne est la base de l'interprétation des différents changements de structures observables après chaque traitement, qu'il s'agisse de la canne ou de la bagasse.

I.4.2. Morphologie de la tige de canne

La reproduction de la canne est asexuée par boutures contenant chacune, un ou plusieurs bourgeons. Sur chaque bourgeon peut se développer une tige primaire, qui à son tour peut former des tiges secondaires et ainsi de suite comme illustré Figure 1.

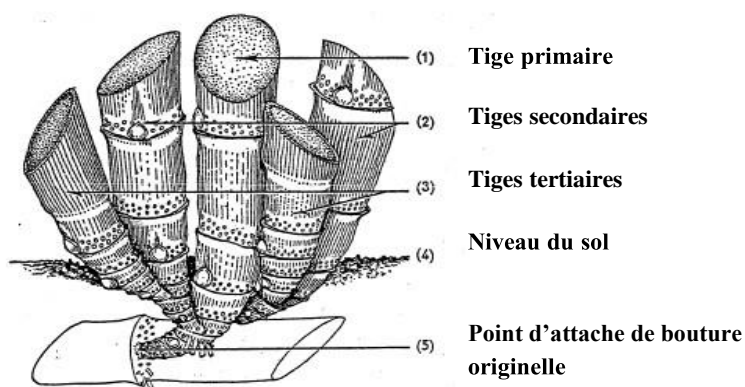


Figure 1 : Portion souterraine d'un pied de canne montrant les tiges (Martin, 1938)

La tige de canne à sucre, illustrée Figure 1, est constituée d'une succession de nœuds, où sont implantés les yeux (bourgeons), mais aussi d'entre-nœuds, gorgés de sucre à maturité. La longueur des entre-nœuds, très réduite au niveau du sol, augmente graduellement le long de la tige pour atteindre jusqu'à 10 à 15 cm. Les variations de longueur des entre-nœuds d'une tige sont associées à la grande période de croissance. La tige peut atteindre 2 à 5 mètres de hauteur, avec un diamètre de 2 à 4 cm. Une touffe de cannes compte généralement 10 à 15 tiges. Chaque tige porte des feuilles alternées atteignant 1 à 2 m de long et 3 à 8 cm de large. [6]

I.4.3. La transformation de la canne à sucre, ses produits dérivés et coproduits

✓ Le sucre

La canne livrée, sous forme de tronçons de tiges, est transportée en sucrerie, pour y être traitée. Les tiges sont alors broyées dans un moulin et on y extrait un liquide sucré, le jus de canne ou vesou, ainsi qu'un résidu fibreux, la bagasse. Le vesou est ensuite chauffé pour évaporation, ce qui produit un sirop, qui une fois clarifié puis concentré permet d'extraire le sucre cristallisé

brut, nommée cassonade. Elle peut être vendue telle qu'elle en tant que sucre roux, ou, après passage en raffinerie, sous forme de sucre blanc.

✓ Le rhum

Pour fabriquer du rhum, le jus de canne filtré est d'abord fermenté puis distillé dans une colonne de distillation, avant d'être mûri voir vieilli pour obtenir du rhum blanc ou du rhum vieux.

✓ Le bioéthanol

Une fois la canne broyée et cuite, une hydrolyse est effectuée au jus de canne avant d'être refroidi. Après fermentation et distillation, on obtient de l'éthanol, auquel il faut ajouter un pourcentage d'essence sans plomb pour obtenir du biocarburant.

✓ La vinasse

La vinasse est le fond de colonne de distillation lors du procédé de fabrication du rhum. Elle peut servir à de la production de gaz utilisables comme combustibles après méthanisation.

✓ Les boues et écumes

Récupérées lors du procédé de fabrication du sucre, leur recyclage peut être effectué dans le domaine de l'agriculture pour enrichir les sols, comme substance d'épandage.

✓ La mélasse

Liquide encore très sucrée, noirâtre et visqueux, la mélasse est le résidu liquide après extraction du sucre du jus de canne, composée de sucre, de vitamine B6 et de minéraux (calcium, magnésium, potassium et fer). Si elle est distillée et fermentée, elle peut conduire à la production du Rhum Traditionnel de Sucrierie ou à de l'éthanol à des fins pharmaceutiques. D'autres fermentations produisent de l'acétone, du glycérol ou de l'acide citrique ;

La mélasse peut également servir d'engrais, notamment comme amendement dans les champs de canne à sucre.

I.4.4. La bagasse de la canne à sucre

La bagasse est le résidu fibreux obtenu en sortie de moulins, lorsque le jus a été extirpé de la canne. Généralement, une tonne de canne produit 300 à 350 kilogrammes de bagasse. Le potentiel mondial d'utilisation est donc d'environ 618 millions de tonnes de bagasse. [1]

Actuellement, la bagasse, grâce à son fort pouvoir combustible, est utilisée dans les sucreries ou les distilleries, pour leur autonomie énergétique, en combustion pour les colonnes de distillations, etc. L'excédent peut être utilisé dans des usines électriques thermiques innovantes, combinant charbon ou bagasse en fonction des périodes de l'année, dans le but de produire de l'électricité.

Enfin, la bagasse peut servir après transformation pour les emballages alimentaires ou encore de la vaisselle jetable. Biodégradable, inerte pour la santé et donc l'environnement, utilisable au four micro-ondes, la bagasse représente une bonne alternative au plastique et au polystyrène.

D'un point de vue physico-chimique, les particules de bagasse sont de longueurs très hétérogènes (jusqu'à 10cm de long), avec un pourcentage de particules fines (<1.25mm) élevé, d'environ 35%. En sortie d'usine, la bagasse possède une teneur en eau d'environ 48%. Mais à 9-10% d'humidité, sans compactage (ce que l'on appellera foisonnée), la masse volumique de la bagasse est d'environ 60kg/m³ car les particules de bagasse sont poreuses et présentent des vides dans leur structure.

I.4.5. Structure et composition des fibres végétales

Les fibres végétales sont des matériaux naturels. Elles peuvent être collectées sur différentes parties de la plante (Tableau 3).

Tableau 3 : Origine des fibres végétales naturelles [4]

Origines	Exemples
Feuilles, troncs	Sisal, bagasse, bambou
Fruits	Coton, noix de coco
Tiges	Chanvre

Les fibres sont généralement classées en deux catégories, les macro-fibres et les microfibrilles. Les macro-fibres ont une longueur comprise entre 10 et 60 mm et un diamètre compris entre 0,1 et 1 mm. Tandis que les microfibrilles ont une longueur inférieure à 10 mm et un diamètre compris entre 10 et 30 µm.

La cellulose, les hémicelluloses et la lignine sont les trois constituants principaux de la matière végétale de la bagasse. Elles représentent respectivement 40-60, 20-40 et 10-25% en masse de

la matière végétale. La composition des fibres végétales varie selon leur origine botanique, entraînant ainsi la variation de leurs propriétés physicochimiques (Tableaux 4).

Tableau 4. Composition botanique de quelques fibres végétales [4]

Fibres	Lignine (%massique)	Cellulose (%massique)	Hémicellulose (%massique)	Matières extractibles (%massique)	Cendres (%massique)
Bagasse	21,8	41,7	28	4	3,5
Feuilles de bananier	24,84	25,65	17,04	9,84	7,02
Tronc de bananier	15,07	31,48	14,98	4,46	8,65
Coir	46,48	21,46	12,36	8,77	1,05
Eucalyptus	25,4	41,57	32,56	8,2	0,22
Sisal	11	73,11	13,33	1,33	0,33
Bambou	<u>25,07</u>	<u>38,9</u>	<u>26,1</u>	<u>3,8</u>	<u>1,8</u>

I.5. LE CIMENT

I.5.1. Généralités

Inventé par Joseph ASPDIN en 1824, le ciment Portland nommé ainsi, car il ressemblait à une pierre extraite sur l'île de Portland au large des côtes d'Angleterre est un liant hydraulique c'est-à-dire qu'il durcit en présence d'eau. Cette hydratation transforme la pâte plus ou moins fluide de départ en un solide pratiquement insoluble dans l'eau. [5]

Le ciment est composé essentiellement de silicates et d'aluminates de calcium résultants de la combinaison de la chaux (CaO) et de la silice (SiO₂), de l'alumine (Al₂O₃) et de l'oxyde de fer (Fe₂O₃) provenant du calcaire et de l'argile extraits de. Il se présente sous l'aspect d'une poudre très fine qui, mélangée avec de l'eau, forme une pâte faisant prise et durcissant progressivement dans le temps. Ce durcissement est dû à l'hydratation de certains composés minéraux, notamment des silicates et des aluminates de calcium, la proportion de chaux et de silice réactive devant être au moins de 50% de la masse du ciment carrières. [6]

Le choix du type de ciment et son dosage dépendent à la fois des performances recherchées (résistance mécanique, résistance aux agents agressifs, apparence) et de la nature des autres composants (granulométrie des granulats).

I.5.2 Fabrication du ciment Portland [6]

Moins énergivore que la voie humide, la voie sèche est la technique la plus employée. Les matières premières sont broyées pour obtenir une poudre fine appelée farine crue ou cru. Cette farine est ensuite chauffée à 1450°C. La réaction chimique produit du dioxyde de carbone (CO₂), et à la sortie du four le clinker obtenu est refroidi. Le ciment Portland est obtenu en mélangeant au clinker une petite quantité de gypse (3 à 5% massique) qui permet de réguler la prise du ciment. Lors de cette étape, des composés d'origine naturelle ou industrielle appelés additifs peuvent être ajoutés dans des proportions variables et faibles (0,5% massique maximum). Ces additifs modifient les propriétés physico-chimiques du ciment telles que la perméabilité à l'eau, la résistance aux chlorures et sulfates.

Les additifs les plus courants sont :

- Le laitier granulé de haut fourneau, sous-produit de l'industrie métallurgique ayant des propriétés hydrauliques. Mélange de chaux, d'alumine et de silice, il est obtenu par trempe de certaines scories fondues provenant de la fusion du minerai de fer dans un haut fourneau.
- Les fumées de silice, sous-produits de l'industrie du silicium et de ses alliages. Elles sont récupérées par des électro-filtres et sont formées de particules sphériques de diamètre de l'ordre du micromètre.
- Les pouzzolanes naturelles peuvent être d'origine volcanique ou sédimentaire. Ce sont des substances siliceuses ou silico-alumineuses.
- Les cendres volantes proviennent des filtres de cheminées des centrales thermiques alimentées au charbon. Elles sont composées de silice vitreuse, d'alumine, d'oxyde de fer et de chaux.
- Le schiste calciné contient des silicates bicalcique, de l'aluminate monocalcique mais aussi des oxydes tels que la silice (SiO₂). Il est produit dans un four à 800°C.
- Le calcaire doit, lorsqu'il est utilisé dans une proportion excédant 5% en masse du constituant principal, présenter une teneur en carbonate de calcium (CaCO₃) supérieure ou égale à 75%

en masse, une teneur en argile ne dépassant pas 1,20 g pour 100 g de matière et une teneur en matière organique inférieure ou égale à 0,5% en masse.

Les propriétés des cendres volantes, fumées de silice, schiste calciné et laitier de haut fourneau sont comparables à celles des pouzzolanes.

I.5.3. Composition chimique finale du ciment et désignation

Il existe différents types de ciments mais leur composition générale reste pratiquement identique (Tableau 1-1). Lors de la fabrication du ciment, les oxydes se combinent pour former des silicates et aluminates hydrauliques, il s'agit des phases suivantes :

- Le silicate tricalcique : $(3\text{CaO}.\text{SiO}_2)$ ou C_3S en notation cimentaire,
- Le silicate bicalcique : $(2\text{CaO}.\text{SiO}_2)$ ou C_2S en notation cimentaire, selon la température il existe différentes variétés allotropiques dont la forme la plus fréquente dans le ciment est la monoclinique $\beta\text{-C}_2\text{S}$,
- L'aluminate tricalcique : $(3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3)$ ou C_3A en notation cimentaire,
- L'alumino-ferrite tétracalcique : $(4\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{Fe}_2\text{O}_3)$ ou C_4AF en notation cimentaire avec $\text{C} = \text{CaO}$, $\text{S} = \text{SiO}_2$, $\text{A} = \text{Al}_2\text{O}_3$, $\text{F} = \text{Fe}_2\text{O}_3$.

Tableau 5. Composition chimique des ciments Portland [9]

Constituants	C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF
Teneurs massiques (%)	50-70	15-30	5-10	5-15

En plus de ces composés majoritaires, d'autres composés tels que les oxydes de magnésium, sodium, calcium, potassium et soufre sont présents dans le ciment.

Tableau 6. Classes de résistance à la compression des ciments courants [7]

Résistance à la compression				
Classe de résistance	Résistance à court terme		Résistance courante à 28 jours	
	À 2 jours	À 7 jours		
32,5 N	-	≥16,0 MPa	≥32,5 MPa	≤52,5 MPa
32,5 R	≥10,0 MPa	-		
42,5 N	≥10,0 MPa	-	≥42,5 MPa	≤62,5 MPa
42,5 R	≥20,0 MPa	-		
52,5 N	≥20,0 MPa	-	≥ 52,5 MPa	-
52,5 R	≥30,0 MPa	-		
N = court terme ordinaire, R = court terme élevé				

I.5.4. Types de ciments

Les types des ciments sont fonction de la teneur en clinker ainsi que d'autres constituants secondaires. Il en existe plusieurs. Le tableau 8 reprend les différents types de ciments courants normalisés avec indication, pour chacun d'eux, de leur désignation propre et des pourcentages respectifs des constituants qu'il comporte.

Tableau 7: Différents types de ciments courants normalisés [7]

Désignation	Types de ciments	Teneur en clinker	Teneur des constituants secondaires
CPA-CEM I	Ciment portland	95 à 100 %	0 à 5 %
CPJ-CEM II/A	Ciment portland composé	80 à 94 %	0 à 5 %
CPJ-CEM II/B		65 à 79 %	0 à 5 %
CHF-CEM III/A	Ciment de haut Fourneau	35 à 64 %	0 à 5 %
CHF-CEM III/B		20 à 34 %	0 à 5 %
CLK-CEM III/C		5 à 19 %	0 à 5 %

CPZ-CEM IV/A	Ciment pouzzolanique	65 à 95 %	0 à 5 %
CPZ-CEM IV/B		45 à 64 %	0 à 5 %
CLC-CEM V/A	Ciment au laitier et aux cendres	40 à 64 %	0 à 5 %
CLC-CEM V/B		20 à 39 %	0 à 5 %

Le ciment est désigné de la manière suivante en prenant l'exemple du ciment CEM II/A-P 32,5R :

- CEM, provenant de la traduction de ciment en anglais,
- II/A-P, désignant la classe du ciment, la gamme des teneurs massiques en clinker et les constituants présents dans le ciment,
- 32,5R, représentant la classe de résistance à la compression (Tableau 1-6).

Conclusion partielle

Cette approche environnementale présente les différents atouts que doit présenter un matériau écologique et biosourcé qui présentent deux principaux avantages, d'abord la matière dont ils sont issus est renouvelable, ensuite ils peuvent contribuer à la réduction des émissions de gaz à effet de serre et au stockage temporaire de carbone. Le cas pour notre étude étant l'utilisation des résidus de bagasse de cannes à sucre, nous avons présenté cette plante ainsi que le ciment auquel nous pourrions l'appliquer.

Chapitre II. APPROCHE METHODOLOGIQUE

Ce chapitre consacré à l'approche expérimentale, a pour objectif principal de présenter et de caractériser les différentes matières premières entrant dans les formulations des différentes compositions, ensuite la description des différents essais fait sur le mortier pour étudier l'influence de l'ajout de cendres de bagasse sur la classe de résistance du ciment (résistance à la flexion et à la compression), mais aussi sur le béton pour son influence sur la résistance à la compression.

Cette partie expérimentale a été faite au laboratoire de physique de la Cimenterie de Katana au Sud-Kivu.

II.1. DESCRIPTION DES MATERIAUX

II.1.1. Obtention de la cendre de bagasse

Les précurseurs secs de bagasse ont été collectionnées par ramassage au Sud-Kivu, ensuite ils ont été calcinés jusqu'à l'obtention de cendres sans présence visuelle d'imbrûlés. La durée de calcination étant de 2 heures, les cendres obtenues ont été broyées manuellement suivant une technique locale sur deux pierres lisses. Après calcination et broyage, les cendres ont été stockées dans un récipient jusqu'à leur utilisation.



Figure 2 : Aspect des cendres après broyage

Après broyage, les cendres ont été tamisées sur une ouverture de 90 μ m et ajoutées au liant suivant différentes proportions allant de 5 à 20%.

Composition chimique des cendres [1]

Les cendres de bagasse de canne à sucre (CBCS600) sont principalement composées d'oxydes de silicium (SiO_2), de potassium (K_2O), d'aluminium (Al_2O_3), de magnésium (MgO), de calcium (CaO) et de fer (Fe_2O_3).

II.1.2. Les liants

Notons que nous avons utilisé le ciment TWIGA CEM II B/L 42.5 provenant de la cimenterie (TWIGA) en Tanzanie dont la classe moyenne de résistance (classe vraie) a été trouvée au laboratoire de l'entreprise SAFRICAS (voir annexe 1).

Ainsi, la qualité de ce ciment constitue une constante au niveau des paramètres d'étude.

II.1.3. Les granulats

Nous avons utilisé des granulats roulés de dimensions 0-5, et les concassées de dimensions 5-15 et 15-25 dont les résultats de l'analyse granulométrique sont présentés dans la troisième partie de ce travail.

II.2. FORMULATION DU BETON : Méthode des abaques de DREUX-GORISSE

Les abaques de Dreux permettent une approche pratique d'une composition de béton répondant à des objectifs déterminés moyennant quelques hypothèses facilitant la démarche. Il est bien évident qu'une fois cette composition déterminée, elle devra, être soumise à l'expérimentation afin d'affiner les dosages indiqués. En général, les données telles que la résistance à la compression du béton comprise entre 20 et 40 MPa à 28 jours ainsi que la maniabilité sont déterminées par le cahier des charges du projet, les conditions du chantier ou la disponibilité des matériaux. Selon les hypothèses de la théorie de Dreux le ciment doit être de classe 42.5.

La formulation d'un béton se fait en lien avec une opération de construction. Nous nous placerons dans le cadre de la formulation d'un matériau allant servir à fabriquer des éléments structurels à l'intérieur d'un bâtiment d'habitation.

Les caractéristiques visées pour notre béton sont :

- Résistance caractéristique en compression sur cylindre à 28 jours : $f_{ck} = 20$ MPa (béton de classe C20/25) ;
- Consistance recherchée pour la mise en œuvre : béton plastique vibré normalement avec un affaissement visé de l'ordre de 7cm (béton plastique)

Les caractéristiques des matériaux à disposition sont :

- Ciment TWIGA CEM II B/L 42,5 (classe de résistance commerciale) ;
- Analyse granulométrique des deux sables et des deux graviers ;

- Sable lavé (sable d'Idjwi), de bonne qualité, de masse volumique absolue $\rho_s = 2538 \text{ kg.m}^{-3}$;
- Gravillons concassés propres, de bonne qualité, de masse volumique absolue $\rho_g = 2500 \text{ kg.m}^{-3}$

La méthode de formulation proposée passe par trois phases :

- ✓ L'obtention du rapport $\frac{C}{E}$ à partir de la résistance et donc la qualité de la pâte visée ;
 - ✓ La détermination de la quantité de pâte C+E et la compacité du squelette granulaire maximum découlant de l'ouvrabilité souhaitée ;
 - ✓ Le bilan des quantités de chacun des constituants (masses de C, E, S, G1, G2) et masse volumique théorique du béton ρ_b .
- ✓ **Recherche du rapport pondéral $\frac{C}{E}$**

Il faut en premier lieu évaluer approximativement le rapport C/E (dosage en ciment/dosage en eau totale sur matériaux secs) en fonction de la résistance moyenne espérée f_{cm} :

$$f_{cm} = K_{DG} \cdot F_{CE} \cdot \left(\frac{C}{E} - 0,5 \right) \quad (5)$$

Avec

- f_{cm} la résistance moyenne en compression à 28 jours [MPa],
 - F_{CE} la classe vraie du ciment à 28 jours [MPa],
 - C le dosage en ciment [kg.m^{-3}],
 - E le dosage en eau totale sur matériaux secs [kg.m^{-3}]
 - K_{DG} le coefficient granulaire.
- ✓ **Coefficient granulaire K_{DG} , méthode Dreux-Gorisse**

Les valeurs du coefficient granulaire données K_{DG} dans le tableau 8 supposent que le serrage du béton est effectué dans de bonnes conditions (par vibration en principe). D_{\max} est le diamètre du plus gros granulat.

Tableau 8 : Coefficient granulaire K_{DG} , méthode Dreux-Gorisse

Qualité des granulats	Granulats fins ($D_{max} < 16\text{mm}$)	Granulats moyens ($25 < D_{max} < 40\text{mm}$)	Gros granulats ($D_{max} > 63\text{mm}$)
Excellente	0,55	0,60	0,65
Bonne, courante	0,45	0,50	0,60
Passable	0,35	0,40	0,45

✓ **Évaluation de la quantité de ciment C et de la quantité d'eau E**

L'abaque figure 4 permet d'estimer la quantité de ciment nécessaire en fonction du rapport C/E estimé par la formule (5) et de l'ouvrabilité désirée, qui peut être identifiée à partir de l'affaissement au cône à l'aide du tableau 11. Le tableau 9 donné à titre indicatif présente les dénominations d'affaissement selon la norme NF-EN-206/CN.

Tableau 9: Évaluation de l'ouvrabilité par référence à l'affaissement au cône [1]

Plasticité	Serrage	Affaissement [cm]	Dénomination
Béton très ferme	Vibration puissante	0 à 2	S1
Béton ferme	Bonne vibration	3 à 5	S1 / S2
Béton plastique	Vibration courante	6 à 9	S2
Béton mou	Piquage	10 à 13	S3
Béton liquide	Léger piquage	+14	S3 / S4 / S5

Et selon la norme EN 206-1, nous les affaissements ont leurs dénominations tel que repris dans le tableau 10.

Tableau 10: Dénomination des affaissements selon la norme EN 206-1 en mm

S1	S2	S3	S4	S5
De 10 à 40	De 50 à 90	De 100 à 150	De 160 à 210	≥ 220

En fonction du rapport C sur E et de l'affaissement, nous trouvons le dosage en ciment C. les valeurs sont reprises dans l'abaque de la figure 4.



Figure 3 : Estimation du dosage en ciment C

Une première estimation de la quantité d'eau E est ensuite déduite du rapport C/E et de la quantité de ciment C identifiée à partir de la figure 4. Cette quantité est ensuite corrigée en fonction de la taille des plus gros granulats D_{max} à l'aide du tableau 11 afin de prendre en compte l'influence de la surface spécifique des granulats.

Tableau 11: Correction en pourcentage d'eau en fonction de la dimension des plus gros granulats

Dimension maximale des plus gros granulats D_{max} [mm]	5	10	16	25	40	63	100
Correction sur le dosage en eau E [%]	+15	+9	+4	0	-4	-8	-12

✓ **Validation du sable**

Le sable est l'élément qui a sur le béton et selon ses qualités, une influence prépondérante :

- Sa propreté est vérifiée par l'essai d'équivalent de sable ;
- Son module de finesse est calculé comme la somme des refus cumulés en pourcentages ramenés à l'unité sur les tamis de modules 23, 26, 29, 32, 35, 38 et il est souhaitable d'avoir une valeur comprise entre 2,2 et 2,8. (Cette définition du module de

finesse est légèrement différente de celle de la norme NF-EN-12620 « *Granulats pour béton* » pour laquelle les modules utilisés sont les modules 22 à 37 de 3 en 3).

Si plusieurs sables sont disponibles, il est possible d'utiliser la règle d'Abrams afin d'avoir un module de finesse optimal $MF_{opt} = 2,5$. En supposant par exemple que seront mélangés un sable S_1 de module de finesse fort MF_1 et un sable fin S_2 de module de finesse MF_2 afin d'obtenir un « nouveau » sable de module de finesse MF_{opt} . Les proportions des deux sables devront être :

Proportion du sable S1

$$S_1 = \frac{MF_{opt} - MF_2}{MF_1 - MF_2}$$

Et proportion du sable S2

$$S_2 = \frac{MF_1 - MF_{opt}}{MF_1 - MF_2}$$

✓ **Tracé de la courbe granulaire de référence**

Sur un graphique d'analyse granulométrique respectant la norme NF-EN 933-1 (linéaire en module et logarithmique en dimension des granulats), on trace une composition granulaire de référence OAB. Le point *O* est placé à l'origine du graphique, le point *B* correspond à la dimension D_{max} des plus gros granulats à l'ordonnée 100%. *A* est appelé *point de brisure*.

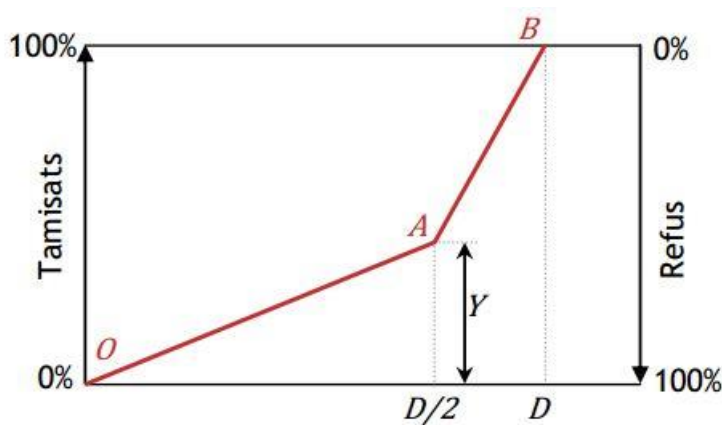


Figure 4: Schéma de principe de la courbe granulaire de référence pour un béton dont les granulats ont un diamètre maximum D_{max} inférieur ou égal à 20 mm.

Le point de brisure *A*, a les coordonnées suivantes :

- En abscisse (à partir de la dimension des plus gros granulats D_{max}) :
- Si $D_{max} \leq 20$ mm, l'abscisse est $D_{max} / 2$;

- Si $D_{max} > 20$ mm, l'abscisse est située au milieu du *segment gravier* limité par le module 38 (5 mm) et le module correspondant à D_{max} ;
 - En ordonnée : $Y = 50 - \sqrt{D_{max}} + K$, où K est un terme correcteur obtenu par le tableau 13 dans les lignes qui suivent.

Deux cas nécessitent une correction supplémentaire du terme correcteur K :

- ✚ Si le module de finesse est différent de 2,5 (la valeur de 2,5 correspond à une valeur optimale), une correction supplémentaire peut être effectuée en ajoutant la valeur $K_s = 6MF_G - 15$ (MF_G étant le module de finesse du sable) ;
- ✚ Si la qualité du béton est précisée *pompable*, il convient de conférer au béton le maximum de plasticité et de l'enrichir en sable par rapport à un béton de qualité *courante* ; le terme correcteur K sera majoré par un terme $K_p = +5$ à $+10$ environ, selon le degré de plasticité désiré.

Tableau 12: Valeur du terme correcteur K en fonction du dosage en ciment, de la puissance de la vibration et de l'angularité des granulats [7]

Vibration	Faible		Normale		Puissante	
	Roulé	Concassé	Roulé	Concassé	Roulé	Concassé
400+Superplastifiant	-2	0	-4	-2	-6	-4
400	0	+2	-2	0	-4	-2
350	+2	+4	0	+2	-2	0
300	+4	+6	+2	+4	0	+2
250	+6	+7	+4	+6	+2	+4
200	+8	+10	+6	+8	+4	+6

✓ **Utilisation de la courbe granulair de référence**

La figure 6 présente la méthode d'utilisation de la courbe granulair de référence afin de déduire les pourcentages des granulats utilisés. Le segment A'B' relie le point A' à 95% de tamisât cumulés d'un granulat avec le point B' à 5% de tamisât cumulés de la courbe granulométrique du granulat directement supérieur en dimension.

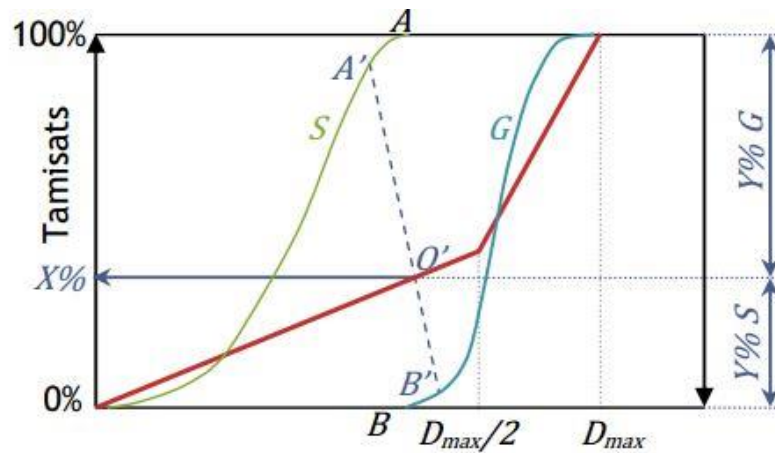


Figure 5 : Utilisation de la courbe granulaire de référence

✓ **Estimation du coefficient de compacité**

Le coefficient de compacité γ estimé à l'aide du tableau 13 permet de déduire la quantité des différents autres composants de la formulation. La compacité γ est définie comme le rapport entre le volume de solide et le volume total du béton :

$$\gamma = V_s / V_{\text{béton}} \quad (8)$$

Le volume de solide V_s est la somme du volume de ciment V_c et le volume de granulats V_g :

$$V_s = V_c + V_g \quad (9)$$

Tableau 13 : Valeur du coefficient de compacité γ

Consistance	Serrage	Coefficient de compacité γ						
		D _{max} =5	D _{max} =10	D _{max} =12,5	D _{max} =20	D _{max} =31,5	D _{max} =50	D _{max} =80
Molle	Piquage	0,750	0,780	0,795	0,805	0,810	0,815	0,820
	Vibration	0,755	0,785	0,800	0,810	0,815	0,820	0,825
	faible	0,760	0,790	0,805	0,815	0,820	0,825	0,830
	Vibration normale							
Plastique	Piquage	0,760	0,790	0,805	0,815	0,820	0,825	0,830
	Vibration	0,765	0,795	0,810	0,820	0,825	0,830	0,835
	faible	0,770	0,800	0,815	0,825	0,830	0,835	0,840
	Vibration normale	0,775	0,805	0,820	0,830	0,835	0,840	0,845
	Vibration puissante							
Ferme	Vibration	0,775	0,805	0,820	0,830	0,835	0,840	0,845
	faible	0,780	0,810	0,825	0,835	0,840	0,845	0,850
	Vibration normale	0,780	0,815	0,830	0,840	0,845	0,850	0,855
	Vibration puissante							

Ces valeurs sont convenables pour des granulats roulés sinon il conviendra d'apporter une correction : sable roulé et gravier concassé = -0,01 ; sable et gravier concassés = -0,03

II. 3. ESSAIS SUR LES MATÉRIAUX

Pour chaque éprouvette à confectionner, nous ferons une addition de la cendre de la bagasse dans les proportions allant de 5 à 25% pour lesquels nous évaluerons les effets sur chaque type d'essai.

II.3.1. NORMES

A--Préparation des matériaux

- *Analyse granulométrique* : EN 933-1
- *Equivalent de sable* : NFP 18-597
- *Essai d'affaissement au cône d'Abrahams* : NFP 18-573
- *Eau de gâchage* : EN 1008
- *Confection des bétons* : EN 12390-2
- *Confection des mortiers* : EN 196-1

B-- Normes utilisées à l'état durci

- *Essai de compression* : NFP 18-406.
- *Essai de traction par flexion* : NFP 18-407.

II.3.2. Obtention du sable normalisé par criblage

Le sable est le constituant du squelette granulaire qui a le plus d'impact sur les qualités du béton et du mortier. Il joue un rôle primordial en réduisant les variations volumiques, les chaleurs dégagées et le prix de revient des bétons. Il doit être propre et ne pas contenir d'éléments nocifs. Il convient de se méfier de la présence de sables granitiques, de micas en paillettes, d'argiles, de sulfates...et dans le cas de sable concassé : des poussières, des plaquettes, des aiguilles.

Un sable normalisé, est un sable naturel, siliceux notamment dans ses fractions les plus fines. Il est propre, les grains sont de forme généralement isométrique et arrondie. Il est séché, criblé et préparé dans un atelier moderne offrant toutes garanties de qualité et de régularité dans le laboratoire d'essais des matériaux.

La composition granulométrique, déterminée par tamisage, est conforme aux exigences de la norme EN 196-1 (§ 5).

Tableau 14 : composition granulométrique du sable normalisé

Tamis ouverture des mailles (mm)	Refus cumulés (%)
0.08	99 ± 1
0.16	87 ± 5
0.50	67 ± 5
1.00	33 ± 5
1.60	7 ± 5
2.00	0

Ces analyses sont complétées par des contrôles de masse des sachets, des mesures du taux d'humidité et des analyses chimiques selon les exigences de la norme EN 196-9.

II.3.3. Confection du mortier normal

Le mortier normal est un mortier qui sert à définir certaines caractéristiques des ciments et notamment la résistance à la traction et à la compression. Ce mortier est réalisé conformément à la norme EN 196-1.

Principe

L'essai consiste à préparer un mortier normal à l'aide d'un sable normalisé. Ce sable est conditionné en sac plastique en dose de 1350 ± 5 g ou criblé en laboratoire comme nous l'avons fait.

Matériels utilisés.

- Un malaxeur à deux vitesses : lente et rapide
- Un appareil à choc
- Une balance précise au gramme, de portée au moins égale à 10 kg,
- Un moule prismatique 4x4x16
- Des bacs.

Préparation du matériau.

Il est recommandé d'utiliser les doses de sable normalisé. Dans le cas où ce dernier n'est pas disponible, il est possible de le reconstituer en laboratoire. Il faudra tamiser à sec un sable en utilisant à cet effet une colonne de tamis normalisée et reconstituer le sable normalisé en

s'assurant que sa courbe granulométrique se situe bien dans le fuseau indiqué dans le chapitre précédent.

Mode opératoire.

Mélanger le sable normalisé avec le ciment à tester et l'eau dans les proportions suivantes : 450 ± 2 g de ciment, 1350 ± 5 g de sable normalisé et 225 ± 1 g d'eau.

Avant d'être utilisé pour l'identification de caractéristiques physique et/ou mécanique, ce mortier est malaxé pendant 4minutes conformément aux prescriptions de la norme :

- ✦ Introduire l'eau en premier dans la cuve du malaxeur ; y verser ensuite le ciment ; aussitôt après, mettre le malaxeur en marche à vitesse lente.
- ✦ Après 30 s de malaxage introduire régulièrement le sable pendant les 30s suivantes. Mettre alors le malaxeur à sa vitesse rapide et continuer le malaxage pendant 30s supplémentaires.
- ✦ Arrêter le malaxeur pendant 1 min 30 s. Pendant les 15 premières secondes enlever au moyen d'une raclette tout le mortier adhérent aux parois et au fond du récipient en le repoussant vers le milieu de celui-ci.
- ✦ Reprendre ensuite le malaxage à grande vitesse pendant 60 s.

Ces opérations de malaxage sont récapitulées dans le tableau 16.

Tableau 15 : Opérations de malaxage du mortier normal.

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

Le mortier prêt, le verser dans des moules prismatiques 4x4x16 cm. La mise en place est réalisée par vibration sur un appareil à choc en raison de 60 coups par couche.



Figure 6 Appareil à choc avec moules prismatiques du laboratoire de la CIMENKI

Elaboration des pâtes de ciment et des mortiers

Pour le mortier normal, nous avons confectionné 30 éprouvettes en raison de 6 éprouvettes par échantillons en fonction de la proportion en cendres tel que repris dans les tableaux 17 et 18 respectivement pour la pâte du ciment et le mortier proprement dit.

Tableau 16 : Formulation des pâtes de ciment

Nom de l'échantillon	CEM II 42,5 (g)	Cendres de bagasse (g)	Eau (g)
M1 0% CENDRES	450	0	225
M2 5% CENDRES	425	25	225
M3 10% CENDRES	400	50	225
M4 15% CENDRES	375	75	225
M5 20% CENDRES	350	100	225

Le tableau suivant décrit les différentes formulations des mortiers normalisés confectionnés

Tableau 17 : Formulation des mortiers

Nom de l'échantillon	CEM II 42,5 (g)	Cendres de bagasse (g)	Sable normalisé (g)	Eau (g)
M1 0% CENDRES	450	0	1350	225
M2 5% CENDRES	425	25	1350	225
M3 10% CENDRES	400	50	1350	225
M4 15% CENDRES	375	75	1350	225
M5 20% CENDRES	350	100	1350	225

II.3.4. Différents essais sur mortier

Les normes ENV 197-1 et NFP 15-301 définissent les classes de résistance des ciments d'après leur résistance à 2 (ou 7 jours) et 28 jours. Ces âges sont donc impératifs pour vérifier la conformité d'un ciment.

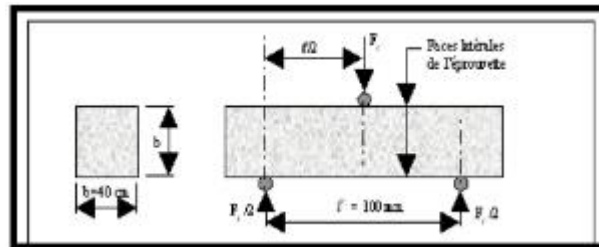


Figure 7: Dispositif pour l'essai de résistance à la flexion

Si F_f est la charge de rupture de l'éprouvette en flexion, le moment de rupture vaut $F_f l/4$ et la contrainte de traction correspondante sur la face inférieure de l'éprouvette est :

$$R_f = \frac{1,5 F_f l}{b^3} \quad (9)$$

Cette contrainte est appelée la résistance à la flexion. Compte tenu des dimensions b et L , Si F_f est exprimée en newtons (N), cette résistance exprimée en mégapascals (MPa) vaut :

$$R_f(\text{Mpa}) = 0,234 F_f \quad (10)$$

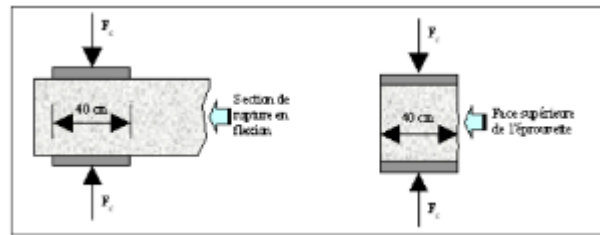


Figure 8: Dispositif de rupture en compression

Les demis-prismes de l'éprouvette obtenus après rupture en flexion seront rompus en compression

Si F_c est la charge de rupture, la contrainte de rupture vaudra :

$$R_c = \frac{F_c}{b^2} \quad (11)$$

Cette contrainte est appelée résistance à la compression et, si F_c est exprimée en newton, cette résistance exprimée en MPa vaut :

$$R_c (Mpa) = \frac{F_c}{1600} \quad (12)$$

La résistance dite résistance normale pour un ciment donné est la résistance ainsi mesurée à l'âge de 28 jours. C'est cette résistance qui définit la classe du ciment : si un ciment a, (à 28 jours), une résistance normale de 42 MPa, on dira que sa classe vraie est de 42 MPa.

Une machine d'essais de résistance à la flexion permettant d'appliquer des charges jusqu'à 20KN avec une vitesse de mise en charge de 50 N/s #177 ;10N/s. La machine doit être pourvue d'un dispositif de flexion tel que celui schématisé sur la photo suivante :



Figure 9 : Machine d'essais de résistance à la flexion

Une machine d'essais à la compression permettant d'appliquer des charges jusqu'à 150 KN (ou plus si les essais l'exigent) avec une vitesse de mise en charge de 2400 N/s #177 ; 200 N/s. Cette machine est équipée d'un dispositif de compression tel que celui schématisé sur la figure suivante :



Figure 10: Machine d'essais à la compression

La proportion du ciment que nous avons utilisé dans le cadre de cette étude a varié selon les quantités de cendres utilisées pour chaque éprouvette.

II.3.4. Formulation du béton

1°) Données et hypothèses

- ✓ $f_{c28} = 20 \text{ Mpa}$;
- ✓ $\sigma_{c28} = 43.3 \text{ Mpa}$ (résultats du laboratoire de SAFRICAS pour TWIGA CEMII B/L 42.5 à voir en anexe)
- ✓ $A = 6\text{cm}$ (pour un béton plastique, voir chapitre II) ;
- ✓ $D = 25\text{mm}$ (dimension du plus gros granulat)
- ✓ Le mode de Vibration est normal
- ✓ Les granulats sont concassés et supposés de qualité passable

Pour le béton, nous avons confectionné également 30 éprouvettes, lesquelles éprouvettes qui ont été écrasés à 7 et 28 jours.

Tableau 18 : Formulation des bétons suivant les proportions de cendres

Nom de l'échantillon	CEM II 42,5 (g)	Cendres de bagasse (g)	Gravillons 15/25 (g)	Gravillons 5/15 (g)	Sable lavé 0/4 (g)	Eau (g)
M1 0% cendres	312	0	946000	160000	668000	198000
M2 5% cendres	287	25	946000	160000	668000	198000
M3 10% cendres	262	50	946000	160000	668000	198000
M4 15% cendres	237	75	946000	160000	668000	198000
M5 20% cendres	212	100	946000	160000	668000	198000

II.3.2. Essais sur le béton

II. 2. 3. Le béton frais

Essai d'ouvrabilité du béton

L'ouvrabilité du béton a été évaluée à l'aide du cône d'Abrams, conformément à la norme NF P 18-451. L'essai a consisté à introduire le béton frais dans un moule tronconique (D = 20, d = 10, H = 30 cm) en trois couches, où chacune a subi 25 coups de piquage à l'aide d'une tige de 16 mm de diamètre, puis le moule a été retiré lentement et la mesure de l'affaissement a été prélevée en (cm).

II. 2. 4. Le béton durci

L'essai réalisé sur le béton durci dans cette étude est la mesure de la résistance à la compression.

Résistance à la compression

La détermination de la résistance à la compression simple des bétons s'est faite sur des éprouvettes cylindriques, l'essai a été réalisé conformément à la norme BS 1881R partie 116. La presse est électrique à doubles manomètres et grands plateaux, ayant une capacité 5 000 kgf. Les résultats ont été obtenus par la formule :

$$R_{Cj} = \frac{F}{A} \quad (\text{MPa}) \quad (13)$$

Où :

- F est la force qui agit sur l'éprouvette en Newton
- A est la section de l'éprouvette en mm

Conclusion partielle

Cette partie expérimentale de notre travail décrit les différents matériaux utilisés, il décrit les méthodes de formulations utilisées mais aussi tous les essais faits sur me mortier et béton qui, on le rappelle, sont constitués des liants dont une partie est substituée en cendres de bagasses

CHAPITRE III. RESULTATS ET DISCUSSION

Dans cette partie, nous allons présenter les différents résultats obtenus concernant l'influence de l'ajout des cendres des bagasses sur les propriétés mécaniques des matériaux cimentaires (mortier et béton).

De par la méthode de substitution que nous avons utilisée, nous proposerons le matériau le plus résistant par remplacement du ciment en remplaçant un certain pourcentage de ciment par ajout des cendres substituées à divers pourcentages (0%,5%,10%,15%,20%), nous allons également présenter les normes, les caractéristiques des différents matériaux utilisés, les procédures de malaxage pour confectionner nos mélanges, bétons et mortiers ainsi que les différents essais expérimentaux pour les caractériser à l'état frais et à l'état durci.

III.I. RESULTATS

A. Sable

Dans tous les mélanges de notre étude, nous avons utilisé un sable local lavé (sable d'Idjwi), il s'agit d'un sable siliceux de classe granulaire (0/5 mm) et utilisé couramment dans la confection du béton dans notre région. Sa courbe granulométrique représentée dans la figure 12

La figure 12 ci-dessous décrit la courbe granulométrique du sable lavé 0/5 (sable d'Idjwi)

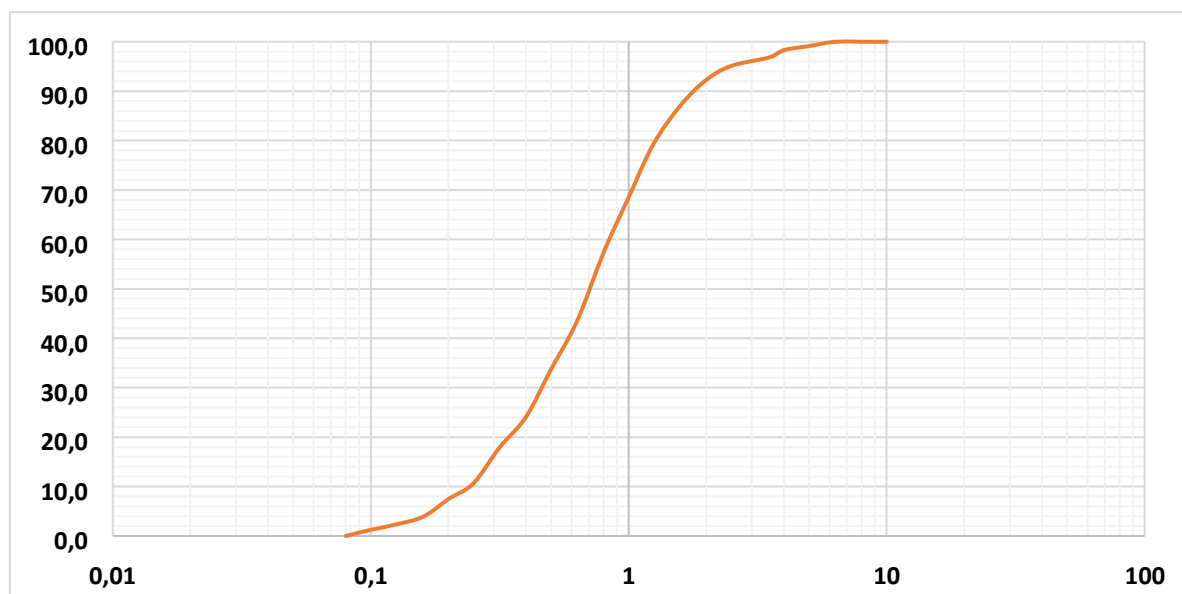


Figure 11 : Courbe granulométrique du sable lavé 0/5

Pour les six différents essais réalisés sur le mortier, nous avons criblé 10 kg de sable lavé (sable d'Idjwi) sur les 6,75 kg nécessaires à la confection de nos différentes éprouvettes. Le

tableau suivant montre les quantités obtenues après criblage pour un total de 10kg de sable normal.

Tableau 19 : Résultats du sable normalisé

Mailles (mm)	Refus cumulés (%)	Proportions pour 100%	Refus cumulés partiels (%)	Masse sur 10kg (kg)
0.08	99 ± 1%	1	13	1.3
0.16	87 ± 5%	13	20	2
0.5	67 ± 5%	33	34	3.4
1	33 ± 5%	67	26	2.6
1.6	7 ± 5%	93	7	0.7
2	0	0	0	0
SOMME				10

B- Gravier

Pour assurer une bonne maniabilité (fluidité) à notre béton, nous avons choisi l'utilisation de deux types de graviers, il s'agit des graviers de type (5/15) et de type (15/25), gravier concassé provenant de la roche volcanique de Goma que nous avons commandé à l'entreprise SAFRICAS.

L'analyse granulométrique et les caractéristiques physiques de ces gravillons sont représentées dans les tableaux figures ci-après :

a. **Graviers concassés 5/15**

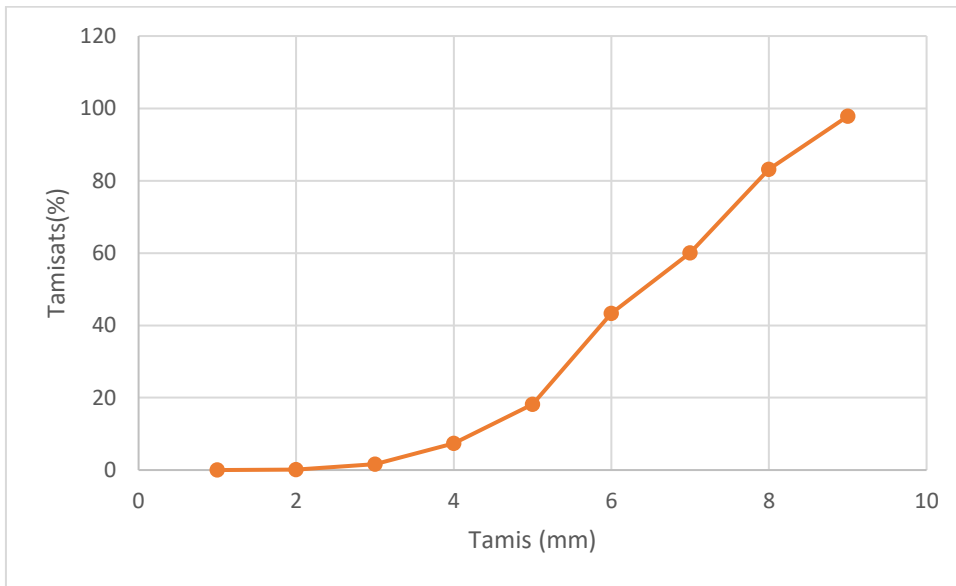


Figure 12 Courbe granulométrique de concassés 5/15

b. **Graviers concassés 15/25**

La figure 14 ci-dessous décrit la courbe granulométrique du sable lavé 0/5 (sable d'Idjwi)

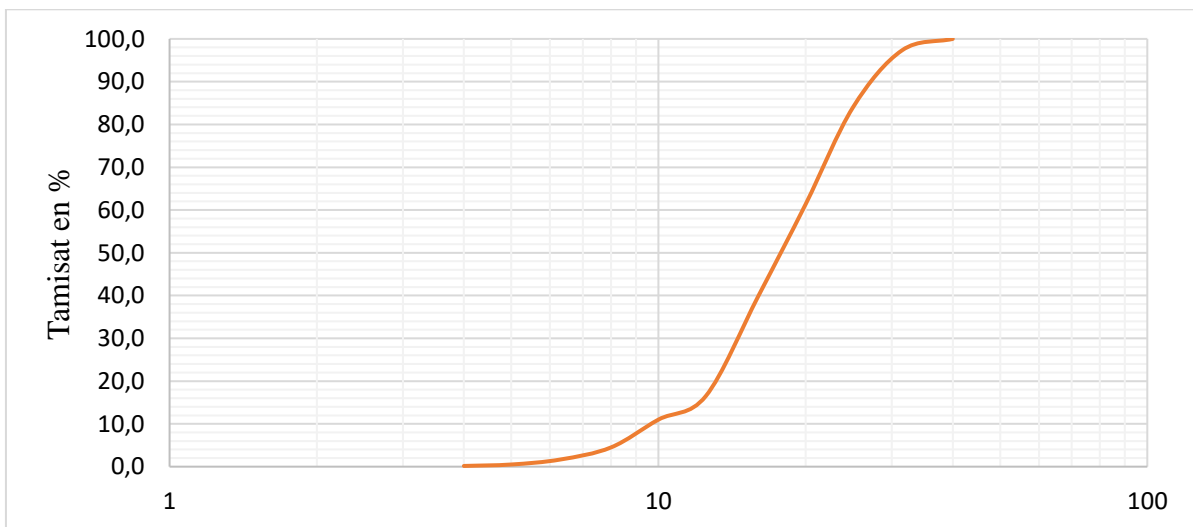


Figure 13 : courbe granulométrique des concassées 15/25

C- Eau de gâchage

Pour le mortier, nous avons utilisé l'eau distillée qui nous a été fourni par le Laboratoire de Physique de la Cimenterie du Kivu et pour le béton, nous avons utilisé de l'eau potable.

III.1.1. Résultats sur éprouvettes de mortier

Les éprouvettes confectionnées ont été soumises à la flexion et à la compression, respectivement par un appareil à flexion et un appareil à compression. Les résultats des résistances à la flexion et à la compression à 2 et 7 jours sont donnés dans le tableau suivant :

Tableau 20 : Résultat de compression et flexion des mortiers préparés

Cendres	Éprouvettes	Résistance à la flexion (MPa)		Résistance à la compression (MPa)		Rf moyen (MPa)		Rc moyen (MPa)	
		2j	7j	2j	7j	2j	7j	2j	7j
0%	1	2,68	4,18	17,75	28,5	2,69	4,19	17,98	28,63
	2	2,65	4,15	18,15	28,75				
	3	2,73	4,23	18,05	28,65				
5%	1	2,66	4,44	17,25	28,45	2,68	4,46	17,72	28,92
	2	2,68	4,46	18,05	29,25				
	3	2,7	4,48	17,85	29,05				
10%	1	2	4,05	16,98	28,68	2,20	4,25	17,34	29,04
	2	2,3	4,35	17,42	29,12				
	3	2,3	4,35	17,61	29,31				
15%	1	1	3,02	11,15	21,75	1,07	3,09	10,67	21,27
	2	1,2	3,22	10,2	20,8				
	3	1	3,02	10,65	21,25				
20%	1	0	1,98	9,75	20,35	0,23	2,24	9,70	20,30
	2	0	2,02	10,15	20,75				
	3	0,7	2,72	9,2	19,8				

III.1.2. Résultat sur le béton

La formulation faite selon la méthode de Dreux-Gorisse nous a donné les dosages suivants et dont les détails sont repris en annexe.

$$C = 312 \frac{Kg}{m^3}$$

$$E = 198,2 \frac{Kg}{m^3}$$

$$S = 668 \frac{Kg}{m^3}$$

$$G_1 = 157,5 \frac{Kg}{m^3}$$

$$G_2 = 946 \frac{Kg}{m^3}$$

Les résultats de résistances à la compression des éprouvettes de béton écrasés à 7 et 28 jours sont repris dans le tableau ci-dessous

Tableau 21 : Effet de l'ajout de la cendre sur la résistance à la compression

Cendres	Éprouvettes	Résistance à la compression (MPa)		Rc moyen (MPa)	
		7j	28j	7j	28j
0%	1	14,07	21,2441523	13,70	20,69
	2	13,67	20,6401963		
	3	13,36	20,1721304		
5%	1	12,76	19,2661964	13,02	19,65
	2	13,02	19,6587678		
	3	13,267	20,0317106		
10%	1	12,978	19,5953524	13,00	19,63
	2	13,11	19,7946579		
	3	12,92	19,5077788		
15%	1	11,55	17,4392295	11,25	16,98
	2	11,24	16,9711636		
	3	10,95	16,5332955		
20%	1	9,75	14,7214275	9,31	14,05
	2	8,97	13,5437133		
	3	10,01	13,890988		

III.5 DISCUSSION DES RESULTATS

III.5.1. Résultats sur Mortiers

a. Résistance à la flexion

Pour les essais au mortier, la figure 15 montre le développement des performances des mortiers contenant différents pourcentages des cendres par substitution (remplacement partiel du ciment par la cendre de bagasse de canne à sucre) dans le ciment en fonction des différents âges.

A deux jours, on remarque que jusqu'à 10% des cendres, la résistance du ciment à la flexion reste inchangée ou diminue que très peu.

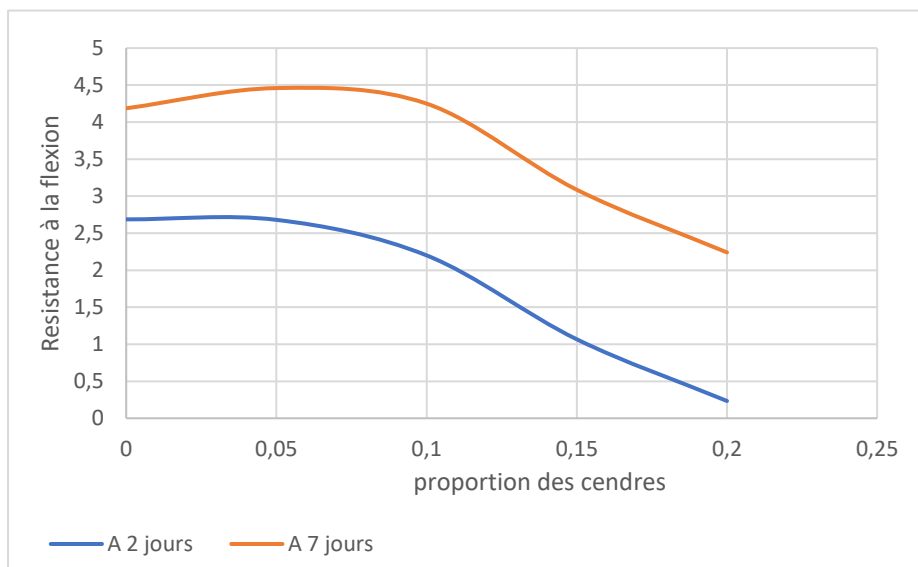


Figure 14: Effet des cendres sur la résistance du mortier à la flexion

Nous remarquons plutôt qu'à 7 jours, l'accroissement des résistances mécaniques à la flexion en fonction de l'âge de durcissement pour le mortier contenant jusqu'à 10% de cendre augmentent sensiblement par rapport à celle du mortier de référence (mortier témoin sans cendre).

Le même constat a été remarqué pour le cas de la compression tel que le décrit clairement la courbe de la figure 16.

b. Résistance à la compression

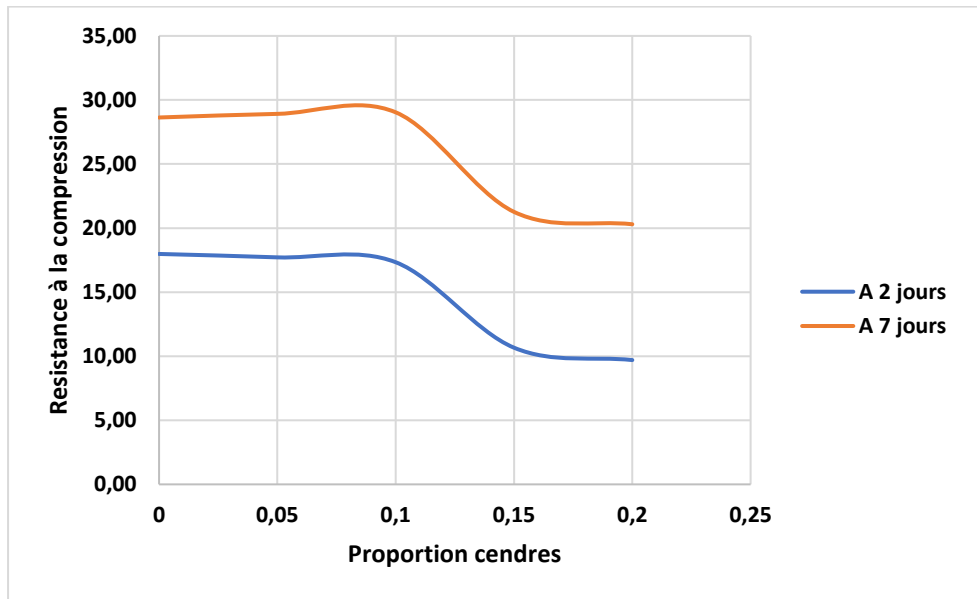


Figure 15: Effet de pouzzolane sur la résistance du mortier à la compression

Des études antérieures ont été faites sur l'influence de l'ajout de la pouzzolane sur les caractéristiques physico-chimiques du ciment, une étude de Nabla BOUALA de l'Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed-Boudiaf en Algérie.

Ses résultats sont donnés dans le tableau suivant [8] :

Ciments	Compression	Compression	Flexion	Flexion
	2j	7j	2j	7j
0%	11.35	23	2.72	4.60
5%	18.33	28	4.32	5.80
10%	15.32	26.53	3.73	5.50
15%	12.50	24	3.02	5.20
20%	10.25	20.80	2.73	4.80

Cette étude démontre que l'accroissement des résistances mécaniques en fonction de l'âge de durcissement pour le mortier contenant jusqu' à 5% de pouzzolane augmentent régulièrement s à celle du mortier de référence (mortier témoin sans pouzzolane). La résistance à la compression diminue avec l'augmentation du pourcentage d'ajout (à court et moyen terme 2 et 7 jours).

III.2.2. Résultat sur béton

Nous avons également appliqué ce ciment écologique cad par addition à ces différentes proportions de cendre à un béton ternaire que nous avons confectionné et les éprouvettes ont été soumises à la compression à 7 et 28 jours telle que le montre la figure 17. On constate ici, comme nous l'avons vu pour le cas du mortier, jusqu'à 10%, la présence des cendres ne modifie nullement pas la résistance à la compression du béton.

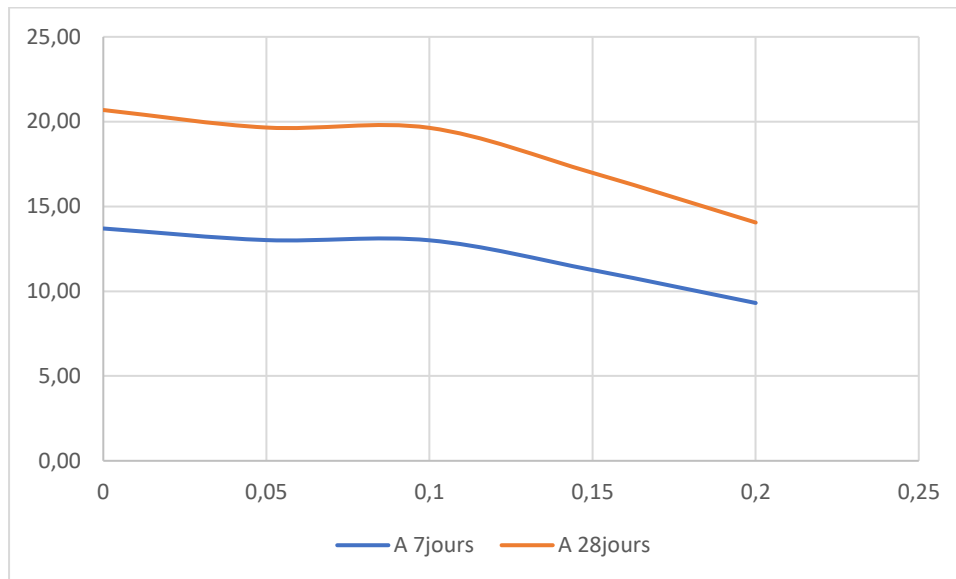


Figure 16 : Effet de la cendre sur la résistance du béton à la compression

Une étude quasiment similaire a été faite à la Faculté des Sciences Exactes et Naturelles de l'Université des Antilles et de la Guyane par Monsieur RODIER. [1]

Ses Résultats ont prouvé que, en plus de la cendre de bagasse de la canne à sucre, les cendres des bambous et de sisal ont été incorporés dans le béton. L'étude de la pouzzolanique des cendres et de la pouzzolane naturelle a montré qu'elles possèdent une certaine activité pouzzolanique et qu'il est possible de remplacer le ciment par :

- 10% en masse de cendres de bagasse de canne à sucre, de cendres de tronc de bambou et de pouzzolane naturelle,
- 15% en masse de pouzzolane naturelle et de 5% en masse de cendres de bagasse de canne à sucre ou de cendres de tronc de bambou,
- 20% en masse de pouzzolane naturelle.

Conclusion partielle

Aux vues des résultats sur le mortier, nous constatons que la cendre prend effet sur les propriétés mécaniques sur une durée à long terme. Cela est peut-être dû au taux d'absorption d'eau des cendres de bagasse dans le mortier car nous avons remarqué que plus on ajoutait de la cendre et plus l'eau était tout de suite dissipée. Il a été observé que plus l'eau se déplace rapidement plus le mortier ou le béton sera susceptible d'émiettement. Plus l'eau se déplacera lentement, plus le ciment sera compact donc susceptible de produire du béton solide.

Jusqu'à 10% des cendres dans le ciment, ni la classe de résistance du ciment ni la résistance à la compression du béton ne varient considérablement

CONCLUSION GENERALE

L'objet de ce travail était l'étude de faisabilité d'un liant écologique issus des résidus agricoles (cendre de bagasse de canne à sucre) en substitution au ciment, en vue d'obtenir des matériaux écologiques pour une construction respectueuse des normes environnementales.

Dans un premier temps, la substitution du ciment par des dérivés agro-industriels (les cendres de bagasse de canne à sucre), ainsi, ces cendres ont été élaborées, puis caractérisées dans l'objectif de la valorisations de la bagasse de canne à sucre couramment vue comme ordure et utilisées comme engrais en vue de lui donner une valeur marchande et contribuer ainsi à la réduction de la production des gaz à effets des serres par des usines de ciment.

L'ensemble des résultats obtenus du point de vue des propriétés mécaniques et de la durabilité du ciment nous ont permis de montrer que jusqu'à une proportion de 10% en dans le ciment ne modifie en rien la classe de résistance du ciment ni les propriétés mécaniques du béton, la réduction étant par ailleurs que trop négligeable.

Ce travail de fin d'étude a montré que la cendre de bagasse de canne à sucre est un atout en substitution ou addition au ciment. Ainsi, une partie des 120 000 tonnes de bagasse produites chaque année serait utilisable pour élaborer des matériaux de construction usant moins de ciment, donc moins coûteux et aussi plus respectueux de l'environnement.

En termes de perspectives, des études complémentaires devront être menées afin d'approfondir l'influence des cendres de bagasse de canne à sucre sur la réduction du taux de corrosion des armatures pour le cas du béton armé mais aussi l'influence sur la perméabilité à l'eau dans le béton. L'autre approche serait d'utiliser plutôt la bagasse de la canne à sucre comme matériaux d'addition à la place des cendres.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] L. RODIER, Matériaux de construction en zone tropicale, Université des Antilles de la Guyane, 2014.
- [2] R. Brundtland, notre avenir à nous tous, 1987.
- [3] C. MAGNIONT, contribution à la formulation et à la caractérisation d'un éco-matériau de construction à base d'agro ressources, Université de Toulouse: Thèse de doctorat, 2010.
- [4] D. Michel, Evaluation du potentiel fibreux de la canne à sucre, Université de la Haute Alsace, 2013.
- [5] LAFARGE, Norme NF EN 197-1, 2001.
- [6] C. C. Holcim, Industrie du ciment, données générales, ATILH: Ecole thématique des matériaux cimentaires, 2008.
- [7] G. D. Jean FESTA, Nouveau guide du béton et ses constituants, Eyrolles 8e édition , 1988.
- [8] N. BOUALA, Influence de l'ajout de la pouzzolane sur les caractéristiques physico-chimiques du ciment, Université des sciences et de la technologie d'Oran, 2011.
- [9] L. A. MANGO, Formulation des matériaux de construction à base de terre et de résidu de canne à sucre, 2017.
- [10] association Béton Quebec, Guide de bonnes pratiques pour l'utilisation des fibres dans le béton, Quebec: ABQ, Janvier 2005.
- [11] P. F. NGAPGUE, cours de physique et Technologie du béton, Université Libre des Pays des Grands Lacs, 2016-2017.
- [12] M. W. M. Abdias, Etude comparative des propriétés des bétons formulés à base des granulats concassés et différents ciments de la ville de Goma, ULPGL GoMA, 2016-2017.
- [13] L.-A. M. ITULAMYA, Formulation des matériaux de construction à base de terre et de résidus, Kwilu Ngongo, RD Congo, 2017.
- [14] K. k. Christian, Mise au point d'éco-matériau à isolation thermique, Institut international de l'ingénierie de l'eau et de l'environnement, Ouagadougou, Juin 2011.
- [15] H. H. M. e. X. JOURDAIN, Formulation d'un béton ordinaire, Ecole Normale Supérieure Paris-Saclay, 2018.
- [16] M. G. e. M. B. OUIS, Sciences des matériaux de construction, Université ABOUBEKR BELKAID, 2008.

[17] www.ecocem.fr, fabrication-du-ciment.

[18] www.infociments.fr, CT-G11.

[19] «méthode de composition du béton».

[20] C. C. HOLCIM, Industrie du ciment, données générales, Ecole thématique matériaux cimentaires, 2008.

ANNEXES

Annexe 1 : Formulation du béton

1°) Données et hypothèses

- ✓ $f_{c28} = 20 \text{ Mpa}$;
- ✓ $\sigma_{c28} = 43.3 \text{ Mpa}$ (résultats du laboratoire de SAFRICAS pour TWIGA CEMII B/L 42.5)
- ✓ $A = 6\text{cm}$ (pour un béton plastique, voir chapitre II) ;
- ✓ $D = 25\text{mm}$ (dimension du plus gros granulat)
- ✓ Le mode de Vibration est normal
- ✓ Les granulats sont concassés et supposés de qualité passable

2°) Détermination du dosage C et E

$$f_{cm} = 1,15 f_{c28} = 1.15 \times 20 = 23 \text{ Mpa}$$

$$f_{cm} = \sigma_{c28} \times G \times \left(\frac{C}{E} - 0.5\right)$$

G est lu sur le tableau 2.1 en sachant que le granulat est passable avec $D = 25\text{mm}$. On trouve que $G = 0.5$

$$\text{On a alors, } \frac{C}{E} = \frac{23 \text{ Mpa}}{G \times \sigma_{c28}} + 0.5$$

$$\rightarrow \frac{C}{E} = \frac{23 \text{ Mpa}}{0,5 \times 43.3} + 0.5 \quad \rightarrow \frac{C}{E} = 1.56$$

Avec le rapport $\frac{C}{E} = 1.56$ on trouve qu'en positionnant ce point sur l'axe de la courbe $\frac{C}{E}$ sur la figure selon l'affaissement ; on trouve que 1.56 se trouve sur une distance de 3cm à partir de la courbe de $300 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$.

Sur l'axe vertical mené à partir de l'affaissement $A=6\text{cm}$, la distance entre les courbes correspondantes à 300 et $350 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$ est de 13mm, alors on a :

$$\frac{350-300}{13} = \frac{C-300}{3} \rightarrow C = 311,5 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3},$$

$$\text{Nous prenons } C = 312 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$$

D'où, $\frac{C}{E} = 1,56$ donne $E = 200 \frac{Kg}{m^3}$ et comme $D = 25mm$ alors la correction sur l'eau est obtenue suivant le tableau 2.2.

D	E
20	0
25	X
31.5	-4

$$\frac{20-25}{20-31.5} = \frac{0-X}{0+4} \rightarrow X = -1.74$$

$$E = 200 \frac{Kg}{m^3} - 1.74\%$$

$$E = 198,26 \frac{Kg}{m^3}$$

3°) Traçage de la courbe granulaire de référence OAB et détermination de proportion de chaque granulat

Ligne de référence OAB

- O est l'origine
- B est le point d'ordonnée 100% de la courbe granulométrique du plus gros granulat.
- Recherche du point A
 - ❖ Comme $D=25mm$ on trouve que $X_A = \frac{D+38}{2} = \frac{45+38}{2} = 41.5mm$ car $D > 20mm$
 - ❖ $Y_A = 50 - \sqrt{1.25 \times D} + K + K'$
- K dépend du dosage en ciment et lu sur le tableau 2.3. Comme $C = 312 \frac{Kg}{m^3}$ et ne se trouve pas sur le tableau, on procède alors à l'interpolation et on trouve que :

C en $\frac{Kg}{m^3}$	K
350	2
312	K
300	4

$$\rightarrow \frac{350-312}{350-300} = \frac{2-X}{2-4} \rightarrow X = K = 3,52$$

- $K' = 6 MF - 15$; avec $MF = 2.6 > 2.5$
 $\rightarrow K' = 6 \times 2.6 - 15 = 0.6$

Nous trouvons alors que $Y_A = 50 - \sqrt{1.25 \times 25} + 3,52 + 0.6 = 48,53\text{mm}$

D'où A (41.5 ; 48.53).

Avec ces coordonnées, la courbe granulométrique donne les proportions suivantes :

% S = 38%

% G = 62%

Avec

G1 = 9% et G2 = 53%

4°) Dosage en Granulat

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

$$\gamma = \frac{V_G + V_S + V_C}{V_{tot.béton}} \text{ avec } V_G + V_S = V_{Granulat}$$

- $V_C = \frac{C}{\rho_C}$ avec $\rho_C = 3.02 \frac{g}{cm^3} = 3020 \frac{Kg}{m^3}$ et $C = 312 \frac{Kg}{m^3}$ alors :

$$V_C = \frac{312}{3012} = 0.1033 \text{ m}^3 = 103.3 \text{ litres}$$

- Comme A = 6cm, D = 25mm et la vibration est normale alors γ est obtenu par interpolation, on a :

γ	D
0.825	20
X	25
0.830	31.5

$$\frac{31.5-20}{31.5-25} = \frac{0.830-0.825}{0.830-X} \rightarrow x = \gamma = 0.8272$$

Et comme les granulats sont des concassés on trouve que $\gamma = 0.8272 - 0.03 = 0.7972$

- Volumes des constituants

$$V_{Granulat} = V = 1000\sigma - V_C = 1000 \times 0.7972 - 103.3 = 0.693 \text{ m}^3$$

$$V_{Sable} = \% S \times V_{Granulat} = 0.38 \times 0.693 \text{ m}^3 = 0.263 \text{ m}^3$$

$$V_{Gravier 1} = \% G1 \times V_{Granulat} = 0.09 \times 0.693 \text{ m}^3 = 0.063 \text{ m}^3$$

$$V_{Gravier 2} = \% G2 \times V_{Granulat} = 0.53 \times 0.693 \text{ m}^3 = 0.367 \text{ m}^3$$

- Masse des constituants :

$$S = \rho_{sable} \times V_{Sable} = 2538 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \times 0.263 \text{ m}^3 = 668 \text{ Kg}$$

$$G1 = \rho_{Gravier 1} \times V_{Gravier 1} = 2500 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \times 0.063 \text{ m}^3 = 157.5 \text{ Kg}$$

$$G2 = \rho_{Gravier 2} \times V_{Gravier 2} = 2630 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \times 0.367 \text{ m}^3 = 946.8 \text{ Kg}$$

Ainsi, pour 1 m^3 de béton on a :

$$C = 312 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$$

$$E = 198,2 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$$

$$S = 668 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$$

$$G_1 = 157,5 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$$

$$G_2 = 946 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$$

Ce qui donne une masse volumique du béton égale à 2281,7 kg

Annexe 2: Analyse granulométrique du sable d'IDJWI

SABLE IDJWI						
TAMIS mm	REFUS g	REFUS %	REFUS CUM %	TAMISAT %	FUSEAU GRANULOMETRIQ UE %	
10	0	0	0,0	100,0		
8,000	0,0	0	0,0	100,0		
6,300	0,0	0	0,0	100,0		
5,000	50,4	3	2,5	97,5		
4,000	140,1	7	9,6	90,4		
2,500	241,6	12	21,7	78,3		
2,000	160,4	8	29,8	70,2		
1,250	290,3	15	44,3	55,7		
0,630	450,3	23	66,9	33,1		
0,500	121,8	6	73,1	26,9		
0,315	320,3	16	89,1	10,9		
0,160	183,2	9	98,3	1,7		
0,080	32,9	2	100,0	0,0		
0,000	0,0	0		0,0		
Fond	10,0		Module de Finesse (MF)			2,77
Total	1991,3					
Poids de l'échantillo n (g)	2000,0	Poids après lavage sur tamis 0,08			Fines (g)	Fines (%)
		1991,3			8,7	0,4



Annexe 3: Composition granulométrique des concassés 5/15

N° Tamis		Ouverture en mm		Refus cumulés		Tamisât
ASTM	AFNOR	ASTM	AFNOR	G	%	%
3''	50	76.2	80			
2 1/2''	49	63.5	63			
2''	48	50.8	50			
1 1/2''	47	38.1	40			
1 1/4''	46	31.7	31.5			
1''	45	25	25			
3/4 ''	44	20	20		0	100
2/3''	43	16	16	65	2,17391304	97,826087
1/2''	42	12.5	12.5	505	16,8896321	83,1103679
3/8''	41	10	10	1195	39,9665552	60,0334448
1/3''	40	8	8	1694	56,6555184	43,3444816
1/4''	39	6.3	6.3	2445	81,7725753	18,2274247
3/16''	38	5	5	2770	92,6421405	7,35785953
5	37	4	4	2940	98,3277592	1,6722408
6	36	3.15	3.15	2985	99,8327759	0,16722408
8	35	2.5	2.5	2990	100	0
10	34	2	2	2990		
12	33	1.68	1.6			
16	32	1.25	1.25			
40	27	0.4	0.4			
50	26	0.315	0.315			
100	23	0.16	0.16			
200	20	0.08	0.08			


Annexe 4 : composition granulométrique des concassés 15/25

N° Tamis		Ouverture en mm		Refus cumulés		Tamisât
ASTM	AFNOR	ASTM	AFNOR	G	%	%
3''	50	76.2	80			
21/2''	49	63.5	63			
2''	48	50.8	50			
11/2''	47	38.1	40			
11/4''	46	31.7	31.5	80	2,67111853	97,3288815
1''	45	25	25	480	16,0267112	83,9732888
3/4 ''	44	20	20	1160	38,7312187	61,2687813
2/3''	43	16	16	1805	60,2671119	39,7328881
½''	42	12.5	12.5	2505	83,639399	16,360601
3/8''	41	10	10	2670	89,148581	10,851419
1/3''	40	8	8	2865	95,6594324	4,34056761
¼''	39	6.3	6.3	2950	98,4974958	1,50250417
3/16''	38	5	5	2985	99,6661102	0,33388982
5	37	4	4	2995	100	0
6	36	3.15	3.15			
8	35	2.5	2.5			
10	34	2	2			
12	33	1.68	1.6			
16	32	1.25	1.25			
40	27	0.4	0.4			
50	26	0.315	0.315			
100	23	0.16	0.16			
200	20	0.08	0.08			

Annexe 5 : classe vraie du ciment TWIGA CEM II 42.5N de SAFRICAS

						QSF - 605					
PROJET : CONSTRUCTION DE LA LIGNE DE 220 KV BUHANDAHANDA - GOMA ET CONSTRUCTION POSTE DE 220/110 (70/33 KV DE BUHANDAHANDA)											
RESISTANCE MECANIQUE DU CIMENT											
MAITRE D'OUVRAGE : SOCIETE NATIONAL D'ELECTRICITE MAITRE D'OEUVRE : ENTREPRISE : AEE POWER/COBRA											
Origine échantillon: GOMA (RDC) /DARES SALAAM (TANZANIE)						Date d'échantillonnage: 21/02/2017			type de Ciment : CEM II B/L 42,5N (TWIGA PLUS)		
Eprouvette ref. No.	Date et temps de préparation éprouvette		Date et temps d'essai		Age Jours	Résistance à la flexion			Résistance à la compression		
	Date	Heure	Date	Heure		Charge kN	Résistance Mpa	Moyenne Mpa	Charge kN	Résistance Mpa	Moyenne Mpa
1	21/02/2017	14h00'	28/02/2017	15h35'	7	2,625	7,38		49,370	30,86	29,99
2	21/02/2017	14h00'	28/02/2017	15h35'	7	2,750	7,73		46,690	29,18	
									46,810	29,26	
									48,270	30,2	
3	21/02/2017	14h00'	28/02/2017	15h35'	7	2,625	7,38	7,500	48,780	30,49	
									47,950	29,97	
4	21/02/2017	14h16	21/03/2017	14h25	28	3,375	9,49		69,66	43,54	43,33
									68,93	43,08	
									68,40	42,75	
5	21/02/2017	14h16	21/03/2017	14h25	28	3,500	9,84		68,58	42,86	
									69,51	43,44	
6	21/02/2017	14h16	21/03/2017	14h25	28	3,325	9,35	9,563	70,90	44,31	
REMARQUE : <p align="center">ACCEPTABLE</p>											
Date : 21/03/2017		Exécuté par : EQUIPE LABORATOIRE				Contrôlé par : Hugo MAMPLUY 					

Annexe 6 : résultat de la masse volumique du ciment TWIGA 42.5N de l'entreprise Safricas

SAFRICAS 		QSF - 605 / A			
LABORATOIRE DE SOL ET DES MATERIAUX					
PROJET: CONSTRUCTION DE LA LIGNE DE 220 KV BUHANDAHANDA - GOMA ET CONSTRUCTION POSTE 220/110 (70)/33 KVDE BUHANDAHANDA (Projet NELSAP)					
DETERMINATION DE LA MASSE VOLUMIQUE DU CIMENT					
Maitre d'ouvrage: Société Nationale d'Electricité (SNEL)					
Maitre d'œuvre:					
Client: AEE POWER/COBRA					
Provenance de matériau: GOMA			Description de l'échantillon: TWIGA PLUS CEM II B/L 42,5N		
Echantillon No.		1	1		
Essai No:		1	2		
Pycnomètre No.		1	1		
Poids d'picnomètre (A) g		498,9	498,9		
Poids d'échantillon + picnomètre (B) g		998,9	998,9		
Poids d'échantillon + picnomètre + eau (C) g		2120,3	2120,5		
Poids d'picnomètre + eau (D) g		1786,0	1786		
Poids de échantillon B - A (E) g		500,0	500,0		
Poids d'eau D - A (F) g		1287,1	1287,1		
Poids d'eau utilisée C - B (G) g		1121,4	1121,6		
Volume d'eau de place F - G (H) ml		165,7	165,5		
Masse volumique (E/H) g/cm ³		3,02	3,02		
Moyenne g/cm ³		3,02			
Observation: ACCEPTABLE					

Annexe 7 : ciment TWIGA 42.5 B/L



Annexe 4 échantillons des éprouvettes des mortiers



Annexe 5 : Eprouvette soumise à la traction



Annexe 6 : Eprouvette soumise à la compression

