UNIVERSITÉ DU BURUNDI
GRENIER DU SAVOIR DU BURUNDI
Dépôt institutionnel officiel
https://repository.ub.edu.bi

Impact des matériaux locaux sur la portance des bâtiments en béton arme post-incendie au Burundi

Nduwimana, Donatien

2021-08
UB, FSI
https://repository.ub.edu.bi/handle/123456789/181

Document téléchargé depuis le **Grenier du Savoir du Burundi** — https://repository.ub.edu.bi

REPUBLIQUE DU BURUNDI

MINISTERE DE L'EDUCATION NATIONALE ET DE

LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ DU BURUNDI



FACULTE DES SCIENCES DE L'INGENIEUR

Département de Génie Civil

IMPACT DES MATERIAUX LOCAUX SUR LA PORTANCE DES BATIMENTS EN BETON ARME POST-INCENDIE AU BURUNDI

Mémoire

Présenté publiquement

Par : Donatien NDUWIMANA

en vue de l'obtention d'un diplôme de

Master en sciences de l'Ingénieur

Option : Génie Civil, Aménagement et Maitrise des Projets

Membres du Jury :

Dr. Ir. Paul NIBASUMBA	: Président
Dr. Ir. Daniel HATUNGIMANA	: secrétaire
Dr. Ir. Emmanuel MIKEREGO	: Directeur du mémoire
Dr. Ir. BIZINDAVYI Josias	: Membre

Bujumbura, Août 2021

Identification des membres du Jury

Dr. Ir. Emmanuel MIKEREGO	: Directeur du mémoire
Dr. Ir. Paul NIBASUMBA	: Président du Jury
Dr. Ir. Daniel HATUNGIMANA	: secrétaire
Dr. Ir. BIZINDAVYI Josias	: Membre

Dédicaces

Du profond de mon cœur, je dédie ce mémoire :

- A Dieu Tout Puissant ;
- A mon cher père *BARAGUNZWA Léonidas*, aucune dédicace ne serait exprimée l'amour, l'estime le dévouement et le respect que j'ai toujours eu pour toi. Repose en paix ;
- A ma très chère mère *NDIBANJE Estella* qui m'a donné la vie et qui a guidé mes premiers pas dans la recherche du savoir et de la réussite. Tout ce que je peux t'offrir ne pourra exprimer l'amour et la reconnaissance que je te porte. Je t'offre ce modeste travail pour te remercier pour tes sacrifices et pour l'affection dont tu m'as toujours entourée ;
- A ma chère épouse *MUNEZERO Fidélité* : tes sacrifices, ton soutien moral, ta gentillesse sans égal, ton profond attachement m'ont permis de réussir mes études.
- A mes très chers enfants *GIRITEKA Acha Chaïli*, *NDUWIMANA Beni Orlan*, *NDUWIMANA Aldo Yan* et *KERANDA Oran Michael* que j'aime de tout mon cœur.
- A mon frère et ma sœur, les mots ne suffisent guère pour exprimer l'attachement, l'amour et l'affection que je porte pour vous et vos familles.
- A mes oncles et tantes qui m'ont toujours soutenu et encouragé.
- A mes cousins et cousines pour leur soutien et affection.
- A tous mes amis et amies qui m'ont soutenu d'une manière ou d'une autre.

Je dédie ce mémoire

Août 2021

Remerciements

A la fin de cet œuvre, je tiens à signifier toute ma gratitude à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à notre formation et plus particulièrement :

- A mon directeur de mémoire *Dr. Ir Emmanuel MIKEREGO*, enseignant à l'université du Burundi pour les conseils et orientations prodigués. Je vous remercie pour votre confiance, votre aide scientifique, tes efforts de formateur et votre soutien permanent.
- A ceux qui m'ont fait l'honneur de faire partie du jury de mon mémoire : Dr. Ir. NIBASUMBA Paul, Dr. Ir. HATUNGIMANA Daniel et Dr. Ir. BIZINDAVYI Josias, tous enseignants à l'université du Burundi dans la faculté des sciences de l'Ingénieur (FSI) pour l'intérêt qu'ils ont porté à ce travail.
- A tous le corps enseignant pour la qualité de la formation reçue.

Un grand merci à ma famille à qui je dois ce que je suis devenue.

Août 2021

Résumé

Le Burundi vient d'enregistrer plusieurs cas d'incendies embrasant les ouvrages en béton armé. Le marché central de Bujumbura est un exemple d'incendie inoubliable dans la mémoire des Burundais. Cela devrait conduire tout un chacun à faire une plus grande vigilance, à réfléchir aux différentes composantes des incendies et, sûrement, à se poser des questions sur la tenue des ouvrages au feu. Dans le but de la contribution scientifique, Ce travail de recherche basé sur une approche expérimentale, analyse l'impact des matériaux locaux sur la portance des bâtiments en béton armé soumis à une température élevée.

Etant donné qu'au Burundi les bétons peuvent être soit de graviers de rivière ou de graviers concassés des carrières, deux catégories de bétons ordinaire (25 MPa) ont été formulés avec deux graviers [graviers de de rivière (GR) et gravier de concassé des carrières(GC)] pour les soumettre à des cycles de chauffage/refroidissement à une vitesse de 5°C/min à 250 °C, 350°C, 450°C, 600°C et 900 °C. L'évolution de la fissuration et deux propriétés mécaniques principales de ces bétons (résistance à la compression et le module d'élasticité) en fonction des températures ont fait objet de notre étude à fin d'enduire la moyenne de cette évolution.

L'analyse a prouvé que les matériaux locaux de fabrication du béton ont des propriétés exigés par la norme (granulométrie et résistance mécaniques). Plusieurs échelles d'observation menée a montré que nos matériaux locaux suivent l'allure normale de la réduction de la résistance caractéristique à la compression du béton définie par l'Euro code 2-annexe 1-2. La différence moyenne du facteur de réduction de la résistance est estimée à 7.76 % (2.75 % à 450°C,-5.6% à 600 °C et 26.12 % à 900°C).

La confrontation des résultats à différentes échelle de chauffage a montré que l'évolution du module d'élasticité est similaire pour les deux bétons BO_GR et BO_GC.

La perte de résistance dans les zones comprimées des structures en béton chauffés à 250°C, 350°C ,450°C, 600°C et 900°C sont estimé respectivement à 5%,15%, 22%, 40% et 88%

Mots-Clés : Matériaux locaux, Béton ordinaire de gravier de rivière, Béton ordinaire de gravier concassé de carrière ; Haute température, Résistance à la compression, module d'élasticité.

Abstract

Burundi has just recorded several cases of fires setting ablaze to reinforced concrete structures. The central market of Bujumbura is an example of unforgettable fire in the memory of Burundians. This should lead everyone to be more vigilant, to think about the different components of fires and, surely, to ask questions about the resistance of structures to fire.This research work based on an experimental approach, analyzes the impact of local materials on the thermomechanical behavior of concrete subjected to high temperature.

Given that in Burundi the concretes can be either river gravel or crushed gravel from quarries, two categories of ordinary concrete (25 MPa) formulated with two gravels [river gravel (GC) and crushed gravel from quarries (GC)] undergo heating / cooling cycles at a rate of 5 ° C / min at 250 ° C, 350 ° C, 450 ° C, 600 ° C and 900 ° C. We are studying the evolution of cracking and two main mechanical properties of these concretes (compressive strength and elastic modulus) as a function of the temperatures applied to coat the average of this evolution.

The analysis proved that the local concrete manufacturing materials have properties required by the standard (granulometry and mechanical strength). Several scales of observation carried out have shown that our local materials follow the normal course of the reduction in the characteristic compressive strength of concrete defined by Euro code 2-annex 1-2. The average difference in the resistance reduction factor is estimated at 7.76% (2.75% at 450 ° C, -5.6% at 600 ° C and 26.12% at 900 ° C).

The comparison of the results at different heating scales showed that the change in elasticity modulus is similar for the two concretes BO_GR and BO_GC.

Keywords: Local materials, Ordinary river gravel concrete, ordinary crushed quarry gravel concrete; High temperature, Compressive strength, elastic modulus.

Table des matières

Identification des membres du Jury i
Dédicaces ii
Remerciements iii
Résumé iv
Abstract v
Table des matières vi
Liste des figures viii
Liste des tableaux x
Sigles et abréviations xi
Avant-propos xii
INTRODUCTION GENERALE 1
Objectif général 1
Objectif spécifique 2
CHAPITRE I. REVUE DE LA LITTERATURE 3
I.1. Contexte général de l'étude 3
I.2. Caractéristique de résistance et de déformation du béton 3
I.3. Incendie des Bâtiments en Béton armé dans le monde 5
I.4. Cas d'incendie des Bâtiments en Béton armé au Burundi 6
I.5. Comportement des granulats à haute température 7
I.6. Comportement du béton aux hautes températures 8
I.7. Comportement des structures en béton armé poste incendie 11
I.8. Conclusion 11
CHAPITRE II. METHODOLOGIE DE L'ETUDE EXPERMENTALE 12
II.1. Introduction 12
II.2. Caractéristiques de chaque composant du béton 12
II.2.1. Ciment 12
II.2.2. L'eau 13
II.2.3. Le sable 13

II.2.4. Le gravier 13
II.3. Formulations des bétons d'étude 15
II.4. Confection des échantillons de Béton 15
II.5. Essai de Chauffage 18
II.6. Essais macrostructuraux 21
II.7. Conclusion 23
CHAPITRE III. PRESENTATION ET ANALYSE DES RESULTATS 24
III.1. Introduction 24
III.2. Résultats de l'analyse granulométrique des granulats 24
III.3. Résultats de la formulation du béton 27
III.4. Observations macroscopiques des effets de la température sur le Béton des matériaux locaux 34
III.5. Evaluation de la perte de résistance structurelle des ouvrages 38
III.5.1. Résistance à la compression 38
III.5.2. Module d'élasticité 40
III.5.3. Perte éventuelle de résistance dans les zones comprimés de la structure poste incendie 45
CONCLUSION GENERALE ET RECOMMANDATIONS 47
Conclusion générale 47
Recommandations 48
Bibliographie 50

Liste des figures

Figure I.1 : courbe expérimentale d'un béton ordinaire [1] 3
Figure I.2 : valeur du coefficient $\varphi(\infty, t0)$ [2] 4
Figure I.3 : À gauche, photo du bâtiment Windsor à Madrid après l'incendie. À droite, dessous du tablier du pont à Bruxelles après l'incendie [3] 5
Figure I.4 : Exemples de désordres de différentes classes, a/ écaillage superficiel, b/disparition du béton d'enrobage des armatures, c/ les armatures sont totalement dégagées et la perte de l'épaisseur de béton atteint 50% [4] 6
Figure I.5 :Marché centrale de Bujumbura sous l'incendie 7
Figure I.6 : Dilatation thermique totale des bétons [8] 8
Figure I.7 : Evolution de la résistance en compression relative des bétons avec la température [12]. 10
Figure I.8 : Module d'élasticité résiduel du béton chauffé à une vitesse de 0.1°C/min, 1°C/min et 10°C/min à différentes températures [15] 11
Figure II.1 : Graviers de la rivière MUGERE. 14
Figure II.2 : Gravier concassés des carrières de Gakungwe 14
Figure II.3 : Moules 10 X 10 X10 cm utilisés pour la confection des échantillons 16
Figure II.4 : Equipement de compactage du béton (Table vibrante) 16
Figure II.5 : organigramme de fabrication des éprouvettes 17
Figure II.6 : Conservation des éprouvettes immergées dans l'eau. 18
Figure II.7 : À gauche, photo du four électrique Haraeus M104 19
Figure II.8 : environnement intérieure du four programmé à 900 19
Figure II.9 : Allure des cycles de chauffage-refroidissement [20]. 20
Figure II.10 : Presse hydraulique programmable 21
Figure II.11 : Programmation de l'essai de compression 22
Figure II.12 : Aperçus de la propagation des microfissures dans l'éprouvette et format des résultats obtenus après écrasement 22
Figure II.13 : Organigramme des étapes expérimentales 23
Figure III.1 : Courbes granulométriques des granulats utilisés. 26
Figure III.2 : Abaque d'estimation du dosage en ciment [18]. 28
Figure III.3 : Estimation des proportions de Granulats 31
Figure III.4 : courbes granulométrique du mélange (Sable+gravier concassé) du béton BO_GC 32
Figure III.5 : courbes granulométrique du mélange (Sable+gravier de Rivière) du béton BO_GR 33
Figure III.6 : Photographies des échantillons avant et après exposition aux différentes températures. 34
Figure III.7 : contrainte de rupture (Mpa) des échantillons du Béton Ordinaire à Gravier de rivière(BO_GR) 35
Figure III.8 : Contrainte de rupture (Mpa) de l'échantillon du Béton ordinaire à Gravier concassé de carrière (BO_GC) 36
Figure III.9 : Evaluation de la perte de résistance par type de gravier pour les structures en béton armé en cas de d'incendie. 37
Figure III.10 : Facteur kc(θ) applicable pour la diminution de la résistance à la compression du béton fck aux températures élevées 39

Figure III.11 : Déformation moyenne des bétons BO_GR et BO_GC à la température ambiante *40*
Figure III.12 : Déformation moyenne des bétons BO_GR et BO_GC à 450°C de chauffage *41*
Figure III.13 : Déformation moyenne des bétons BO_GR et BO_GC à 600°C de chauffage *42*
Figure III.14 : Déformation moyenne des bétons BO_GR et BO_GC à 900°C de chauffage *43*
Figure III.15: Vue globale de la variation des propriétés mécanique des bétons sous l'influence de la température de chauffage *44*
Figure III.16: Illustration des éléments porteurs d'une structure à risque de perte de résistance en cas d'incendie *45*
Figure III.17: Pourcentage rapportés à la Perte éventuelle de résistance dans les zones comprimées des poteaux et poutres en béton armé *46*

Liste des tableaux

Tableau II-1. Paramètres physiques du sable utilisé. 13
Tableau II-2. Paramètres physiques du Gravier utilisé. 15
Tableau II-3 : Temps de chauffage en fonction de la température....20
Tableau III-1 : Granulométrie du sable de la rivière MUGERE 24
Tableau III-2 : Résultats de l'analyse granulométrique des deux catégories de graviers....25
Tableau III-3 : Données de base pour la formulation du béton....27
Tableau III-4 : Correction sur le dosage en eau en fonction de la dimension maximale D des granulats (si D ≠25 mm) 28
Tableau III-5 : coordonnées de la courbe de référence 30
Tableau III-6 : coordonnées de la courbe de référence 31
Tableau III-7 : coordonnées de la courbe de référence 32
Tableau III-8: Formulation du Béton de l'étude 33
Tableau III-9 : Contraintes maximales de rupture des échantillons du Béton Ordinaire à Gravier de rivière (BO_GR) : 35
Tableau III-10 : Contraintes maximale de rupture des échantillons du béton Ordinaire à Graviers concassé de carrière (BO_GC)....36
Tableau III-11 : Estimation moyenne de la perte de résistance des structures en matériaux locaux par rapport à la prévision de la norme euro code....38
Tableau III-12 : Facteur de réduction de la résistance en fonction de la température de chauffage.....39
Tableau III-13: Perte de résistance dans les zones comprimées des structures en béton armé (%) 46

Sigles et abréviations

BO_GR : Béton Ordinaire de Gravier de Rivière

BO_GC : Béton Ordinaire de Gravier concassés des carrières

fck(t) : la résistance caractéristique en compression du béton au temps t

fcm : la résistance moyenne en compression du béton

Ecm : module d'élasticité

V_G :Volume des Granulats

Kc(θ) : Facteur de réduction de la résistance en fonction de la température de chauffage

Avant-propos

Le travail présenté dans ce mémoire vise une meilleure compréhension du comportement du béton sous l'effet de l'élévation de la température. L'utilisation abondante du béton dans pratiquement tous les ouvrages de génie civil implique la nécessité d'évaluation de la sécurité de ces ouvrages vis-à-vis des incendies. Ce risque d'endommagement des éléments en béton sous les températures très élevées est assez fréquent dans les infrastructures de génie civil comme les bâtiments.

Dans le but de réduire ce risque, l'évaluation de la performance du béton lorsqu'il est soumis à des températures extrêmes est d'un grand intérêt. Lorsque le béton est soumis à une augmentation de température, différents phénomènes consécutifs à des transformations chimiques et physiques se produisent. Ces phénomènes peuvent concerner la pâte de ciment durci, les granulats ainsi que la zone interraciale pâte-granulats.

Les inspections après incendie ont tous fait état de structures en béton fortement endommagées avec, dans les endroits les plus violemment exposés au feu ou des zones de béton clairement détachées. Dès lors, nous comprenons bien le danger que peut représenter un tel phénomène pour la bonne tenue de la structure.

C'est dans cette logique que le travail vise à analyse le comportement du béton avec granulats concassés des carrières de GAKUNGWE par rapport à celui des granulats roulés de la rivière MUGERE face à l'incendie à fin de prédire l'impact des matériaux locaux sur la portance structurale des bâtiments en béton armé post-incendie au Burundi.

Août 2021

INTRODUCTION GENERALE

Le béton est un matériau composite, les phases granulaires sont enrobées par du ciment hydraté qui sert de liant. Ce dernier est un matériau poreux, avec des pores qui sont plus ou moins connectés. La présence de l'eau est nécessaire pour faire hydrater le ciment et former une pâte durcie. Les granulats constituent le squelette du béton. On peut comprendre facilement l'importance des granulats dans un mélange de béton si l'on considère qu'il constitue environ 70 % du volume spécifique de celui-ci. Ils sont constitués de Sables et de gravier (gros granulats). Cependant, les granulats doivent satisfaire à certaines exigences de qualité pour qu'ils soient utilisés dans le béton.

Lorsque le béton est soumis à une augmentation de température, différents phénomènes consécutifs à des transformations chimiques et physiques se produisent. Ces phénomènes peuvent concerner la pâte de ciment durci, les granulats ainsi que la zone interraciale pâte-granulats.

Les inspections après incendie ont tous fait état de structures en béton fortement endommagées avec, dans les endroits les plus violemment exposés au feu, des zones de béton clairement détachées. Dès lors, nous comprenons bien le danger que peut représenter un tel phénomène pour la bonne tenue de la structure.

Dans ces dernières années où le Burundi vient d'enregistrer plusieurs incendies embrasant les différents types de structures (Marchés Publics ; Habitations individuelles, Stations de Servie et Bâtiments de Bureaux), il est plus que nécessaire de savoir l'impact des matériaux locaux sur la portance des bâtiments en béton arme post-incendie.

On sait que la température influe beaucoup sur la résistance et la durabilité de béton, ce dernier se dégrade régulièrement de l'extérieur vers l'intérieur pendant et après la durée de l'échauffement. Ces endommagements peuvent affecter la stabilité des ouvrages et réduit sa résistance.

Objectif général

L'étude expérimentale présentée dans le cadre de ce mémoire avait comme objectif l'analyse de l'impact des matériaux locaux sur l partance structurale des bâtiments en béton armé post-incendie au Burundi.

Cela nous permettra de Contribuer dans la détermination de la portance des bâtiments locaux en béton armé post- incendie et de fournir des résultats qui complètent les données de la littérature sur le plan national et internationale afin de prédire les effets de l'incendie sur la résistance des structures.

Objectif spécifique

Le présent travail pose un lien entre la formulation du béton et son comportement à de hautes températures. Ce travail a comme objectif spécifique l'analyser du comportement du béton avec granulats concassés des carrières de GAKUNGWE et celui des granulats roulés de la rivière MUGERE face à l'incendie à fin de prédire l'impact des matériaux locaux sur la portance structurale des bâtiments en béton armé post-incendie au Burundi.

Pour viser ces objectifs, le présent travail s'est articulé sur quatre chapitres :

Le premier chapitre présente une synthèse des travaux réalisés sur l'évolution des propriétés physiques et mécaniques des bétons soumis à de hautes températures. Cette analyse bibliographique nous a permis d'orienter notre travail de recherche vers une étude de dégradation des bétons à haute température sur le plan expérimental.

Le deuxième chapitre est consacré sur l'étude expérimentale portant sur des relations entre le comportement mécanique et thermique pour les deux types de béton en variant l'origine des gros granulats (granulats de rivière (GR) et granulats concassés des carrières (GC)).

Le troisième chapitre concerne l'analyse et discussions des résultats .Dans ce chapitre nous avons essayé d'évaluer la variation des paramètres de résistance mécanique du béton pour une structure en béton armé réalisé en matériaux locaux.

Finalement, nous avons clôturé ce travail par une conclusion générale et des recommandations.

CHAPITRE I. REVUE DE LA LITTERATURE

I.1. Contexte général de l'étude

Des incendies spectaculaires, ces dernières années, ont montré que le béton pouvait être très fortement sollicité. Ainsi il apparaît qu'assurer un bon comportement du béton en température permet de sauver des vies et de diminuer les frais d'immobilisation et de réparation des structures endommagées. Dans cette partie seront présentés le contexte de l'étude sur base des résultats des travaux menés dans l'étude du comportement des bétons à des températures élevées. Ces résultats sont nécessaires à la maitrise du comportement d'une structure en béton sous l'incendie. Une attention particulière sera portée sur :

1. les cas réels d'incendie où l'instabilité thermique des structures déjà étudiés par d'autres chercheurs,
2. les évolutions des caractéristiques mécaniques du béton
3. le processus de dégradation des bétons à haute température.

Après avoir souligné les préjudices liés aux instabilités thermiques, nous justifierons l'effort de notre recherche mené dans ce domaine.

I.2. Caractéristique de résistance et de déformation du béton

Yannick Seifert [1] a montré que le comportement du matériau est non linéaire. Le pic de résistance est obtenu pour une déformation proche de 2‰. Puis, la macro-fissuration se développe, entrainant la rupture du béton de façon adoucissante. La déformation ultime est proche de 3.5‰.

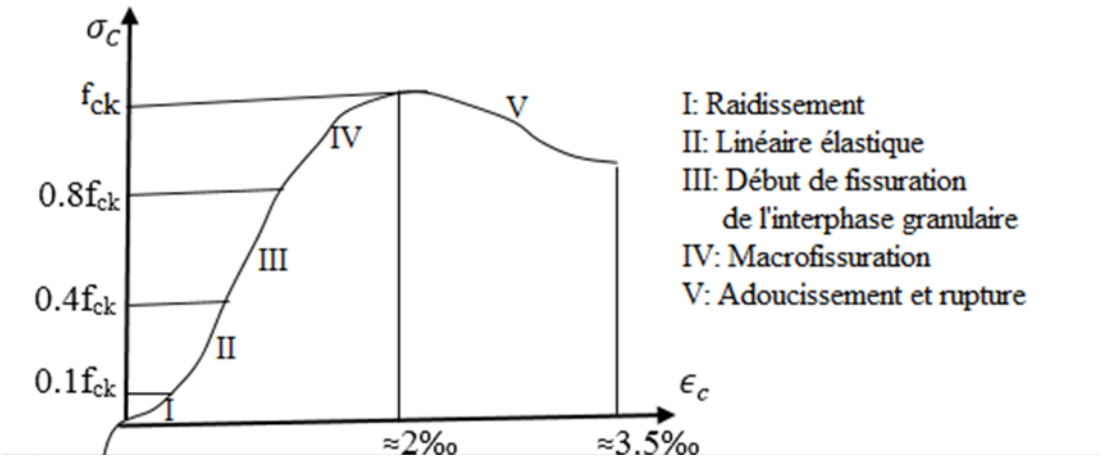


Figure I.1 : courbe expérimentale d'un béton ordinaire [1]

On peut distinguer, à déformation croissante, trois phases de comportement :

1. Une phase de comportement analogue à celui d'un matériau homogène et élastique, se traduisant par une relation à peu près linéaire entre la contrainte et la déformation.

2. La phase de développement de la microfissuration qui entraine une incurvation progressive de la courbe jusqu'à l'atteinte du maximum de contrainte.

La phase de développement des surfaces de fracture et d'une fissuration plus ou moins généralisée, c'est-à-dire la propagation progressive de la rupture.

Selon Euro code 2, la résistance en compression du béton, $f_{ck}(t)$, à l'instant t,est donné par:

$f_{ck}(t) = f_{cm}(t) - 8$ (MPa) pour $3 < t < 28$ jours

$f_{ck}(t) = f_{ck}$ pour t = 28 jours.

Le module d'élasticité en Gpa est donné par la formule :

E_{cm} (GPa)= $22[(f_{cm})/10]^{0,3}$

Où (f_{cm} en MPa)est la résistance moyenne en compression du béton à l'âge de t jours

La déformation de fluage du béton à l'instant $t = \infty$, ε_{cc} (∞, t_0) sous une contrainte de compression constante $\boldsymbol{\sigma}_c$ appliquée à l'âge du béton t_0, est donnée par : $\varepsilon_{cc}(\infty,t_0) = \varphi(\infty,t_0).(\sigma_c/E_c)$

Le coefficient de fluage $\varphi(\infty, t_0)$ est fonction de *E***c**, le module tangent, qui peut être pris égal à 1,05 *E*cm.

*t*0 , âge du béton au moment du chargement.

$\varphi(\infty, t_0)$ = 1 à t_0=28 j comme le montre l'abaque de la figure I.1

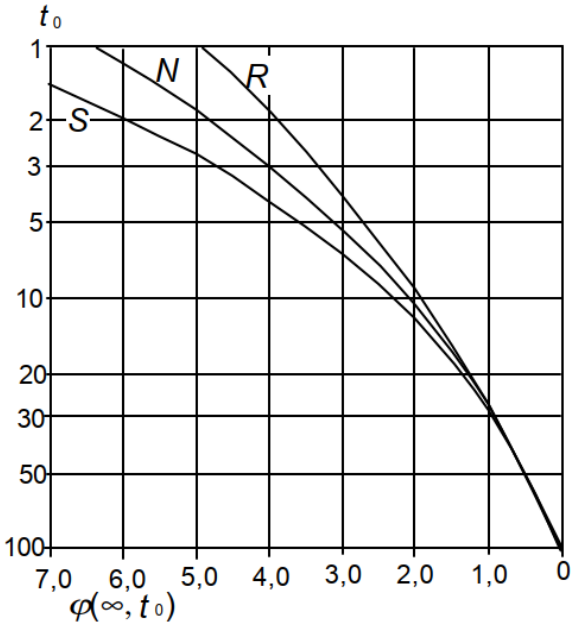


Figure I.2 : valeur du coefficient $\varphi(\infty, t_0)$ [2]

I.3. Incendie des Bâtiments en Béton armé dans le monde

Les incendies qui ont provoqué un endommagement significatif des structures dans le monde sont multiples. A titre d'exemple le viaduc des trois Fontaines, construit en 1981 à Bruxelles, qui a subi l'agression d'un large feu localisé durant la nuit du 6 au 7 décembre 2003 [1]. Une température de 750°C été atteinte à la surface des poutres et le tablier. Les poutres présentent à plusieurs endroits des éclatements de béton au droit des semelles et des âmes. A certains endroits, des armatures et des torons précontraints sont visibles. En face inférieure de la dalle, des éclatements de béton (détachement de morceaux) sont aussi visibles.

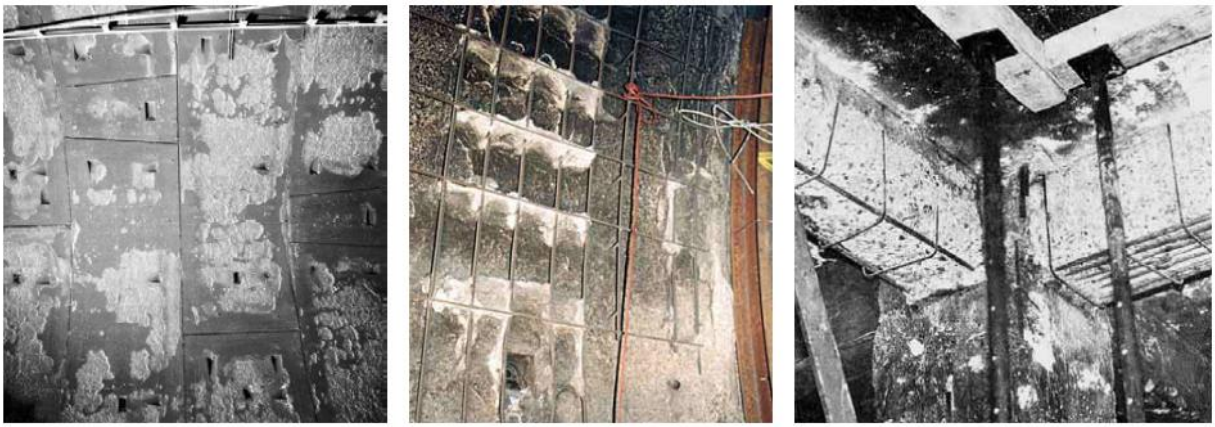


Figure I.3 : À gauche, photo du bâtiment Windsor à Madrid après l'incendie. À droite, dessous du tablier du pont à Bruxelles après l'incendie [3]

Contrairement aux incendies dans les tunnels et au droit des autres ouvrages d'art, les incendies dans les bâtiments sont beaucoup plus fréquents (on dénombrait par exemple en France 68300 incendies déclarés dans les bâtiments en 1997. Cela peut être expliqué par le caractère moins sévère d'un incendie se déclarant dans un bâtiment (feux en principe "cloisonnés", rapidité d'intervention des secours,…) et donc par les moindres répercussions sur le béton des structures. Selon un rapport de Malhotra 1984, l'analyse de 100 incendies dans différents bâtiments fait état d'instabilité thermique du béton de structure dans 80% des cas. Il faut cependant noter que pour tous ces incendies, l'instabilité thermique du béton n'a pas entrainé la ruine de la structure. A titre d'exemple, nous présentons sur la Figure 4 l'état d'un poteau en béton après l'incendie de la tour Windsor à Madrid en 2005.

Dans le cas des tunnels routiers, les températures qui s'installent lors des incendies peuvent être supérieures à 1000°C [3]. On peut citer le cas de l'incendie du tunnel du Mont-Blanc (24 mars 1999),

où une investigation in situ complétée par une étude au Laboratoire Central des Ponts et Chaussées LCPC [4] a montré qu'il existe des désordres de différentes classes après l'incendie. Cela a permis d'évaluer les caractéristiques mécaniques résiduelles du béton de la structure ainsi que la profondeur de l'endommagement dans le but d'optimiser les travaux de réparations.



a- classe 2 b- classe 3 c- classe 4

Figure I.4 : Exemples de désordres de différentes classes, a/ écaillage superficiel, b/disparition du béton d'enrobage des armatures, c/ les armatures sont totalement dégagées et la perte de l'épaisseur de béton atteint 50% [4]

I.4. Cas d'incendie des Bâtiments en Béton armé au Burundi

Au Burundi, dans ces derniers jours on enregistre plusieurs cas d'incendies. Cependant, on peut déplorer un manque d'information dans la littérature concernant l'état d'endommagement du béton après incendie. Sentamba [5] précise que plusieurs cas d'incendies embrasant les marchés tant de province que de la capitale Bujumbura sont enregistrés : les marchés de Ngozi réduit en cendre à quatre reprises (2000, 2006, 2010 et 2011), de Kayogoro (2011), de Bururi (2011), de Nyanza-lac (2011),de Kirundo (2012), de Rushubi (2012), de Kamenge (2012), etc.

Devant ces incendies aussi répétitifs que désastreux pour l'économie nationale, il convient de faire une étude approfondie sur les matériaux locaux et surtout ceux qui sont utilisés dans les structures en béton armé afin de contribuer dans la détermination de la portance des bâtiments locaux en béton armé post-incendie.



Figure I.5 :Marché centrale de Bujumbura sous l'incendie

I.5. Comportement des granulats à haute température

A haute température, les granulats se décomposent et subissent des transformations chimiques et minéralogiques importantes qui modifient les caractéristiques micro-structurelles du matériau [13]

La majorité des granulats est généralement stable jusqu' à 600°C [6]. Par contre, les granulats non siliceux peuvent subir des transformations chimiques et des réactions de décomposition à des températures inférieures à 600°C. Une analyse thermique différentielle (ATD) permet de déterminer, par des pics endothermiques et exothermiques, les températures.

Les granulats occupent une part importante du volume total du béton (de 50% à 80%). Leur dilatation thermique influence donc fortement la dilatation thermique du béton. Généralement, les granulats utilisés pour la confection des bétons présentent une expansion thermique sur la gamme de température atteinte lors d'un incendie. Il est admis que l'expansion thermique des granulats dépend principalement de leur teneur en silice. Les roches à haute teneur en silice comme les grès ou les quartzites ont une forte expansion thermique (de plus, la transformation du quartz _**α** en quartz_***β*** à 573°C s'accompagne d'un gonflement du granulat). Les roches ne contenant pas ou peu de silice, telles les roches calcaires, ont des expansions thermiques moins importantes [7].

Le comportement extraordinaire du béton est lié à la capacité de la pâte de s'accommoder de ces déformations différentielles. Ce phénomène est connu sous le nom de LITS (load induced thermal strain') qui correspond à une relaxation du béton sous déformations imposées. La dilatation thermique totale (Δl / l)c du béton calculée à partir de 20 °C peut être définie .

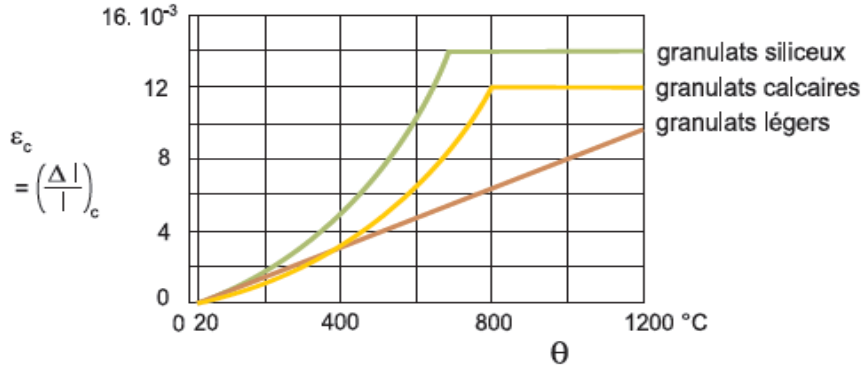


Figure I.6 : Dilatation thermique totale des bétons [8]

Les granulats subissent durant le chauffage une importante expansion volumique non proportionnelle à la température et fortement influencée par leur nature chimique. Une augmentation significative de l'expansion de la plupart des granulats est observée au-delà de 550°C qui s'explique par les modifications chimiques et cristallines qu'ils subissent.

La combinaison des deux déformations durant le chauffage, le retrait de la pâte de ciment et l'expansion des granulats, engendrent des microfissurations et des contraintes au sein du béton. Les transformations et les décompositions chimiques des différents constituants du béton s'accompagnent par contre de variations dimensionnelles.

I.6. Comportement du béton aux hautes températures

Exposée à de hautes températures, la microstructure du béton subit d'importantes modifications physico-chimiques qui influencent son comportement mécanique. Il apparaît que ces modifications ont un comportement irréversible en raison du caractère irrémédiable des réactions chimiques (déshydratation) et micro-structurelles (rupture de cohésion) qui se produisent. L'objectif de ce paragraphe est d'analyser l'évolution des propriétés mécaniques du béton (la résistance à la compression, à la traction et son module d'Young) avec la température.

Samia [9] a montré l'étude du comportement du béton à haute température consiste en l'observation de la variation de la résistance en compression résiduelle du béton testé avec les températures des paliers.

Ainsi après une incendie, le béton situé dans les zones soumises à des températures dépassant 300 °C est enlevé et remplacé. Les expériences faites par Abrams [10] ont présenté des différences de comportement entre matériaux siliceux et calcaires, il rapporte que les bétons réalisés à partir de granulats calcaires présentent des résistances plus élevées que des bétons réalisés à partir de granulats siliceux.

Abrams [10] a confirmé que, à des températures supérieures à environ 430°C, un béton à base de granulats siliceux perd un pourcentage plus élevé de sa résistance que des bétons confectionnés avec des granulats calcaires, mais une fois la température de 800°C atteinte, le comportement de ces différents bétons est semblable.

Mindeguia [11] a montré que sans application de charge mécanique, les bétons présentent tous un comportement dilatant avec l'élévation de la température. Malgré tout, une dilatation thermique est plus importante pour le béton de granulats silico-calcaires dès 370 °C ainsi que des déformations résiduelles après refroidissement plus élevées. Ceci est une fois de plus attribué à la fissuration importante de l'éprouvette sous l'effet des incompatibilités de déformation entre la pâte et les granulats siliceux (silex), Mindeguia aussi a confirmé que les performances mécaniques des bétons se dégradent avec l'élévation de la température : résistance en compression et module d'élasticité diminuent [11]

La figure I.7 regroupe les résistances en compression déterminées à chaud obtenues par Phan et CARINO [12]et comparées à celles obtenues par d'autres chercheurs.

De 200 à 400°C, la résistance en compression augmente par rapport à la valeur la plus faible à 150°C. Cette augmentation peut avoir comme origine le départ de l'eau du matériau, celle-ci provoquant un retrait de la matrice pouvant ré-augmenter les forces d'attraction par le rapprochement des feuillets de CSH [13], [11]. Kanema [14] indique également que ce gain de résistance provient de l'hydratation supplémentaire de la matrice cimentaire due à la migration de l'eau libre dans les pores.

A partir de 400°C, tous les bétons présentent une baisse significative de la résistance en compression. Ceci peut être expliqué en grande partie par les transformations chimiques et minéralogiques qui modifient la microstructure de la pâte de ciment. Mais également, la déformation différentielle entre les granulats, qui se dilatent, et la pâte de ciment, qui subit un retrait important, permet d'expliquer cette diminution.

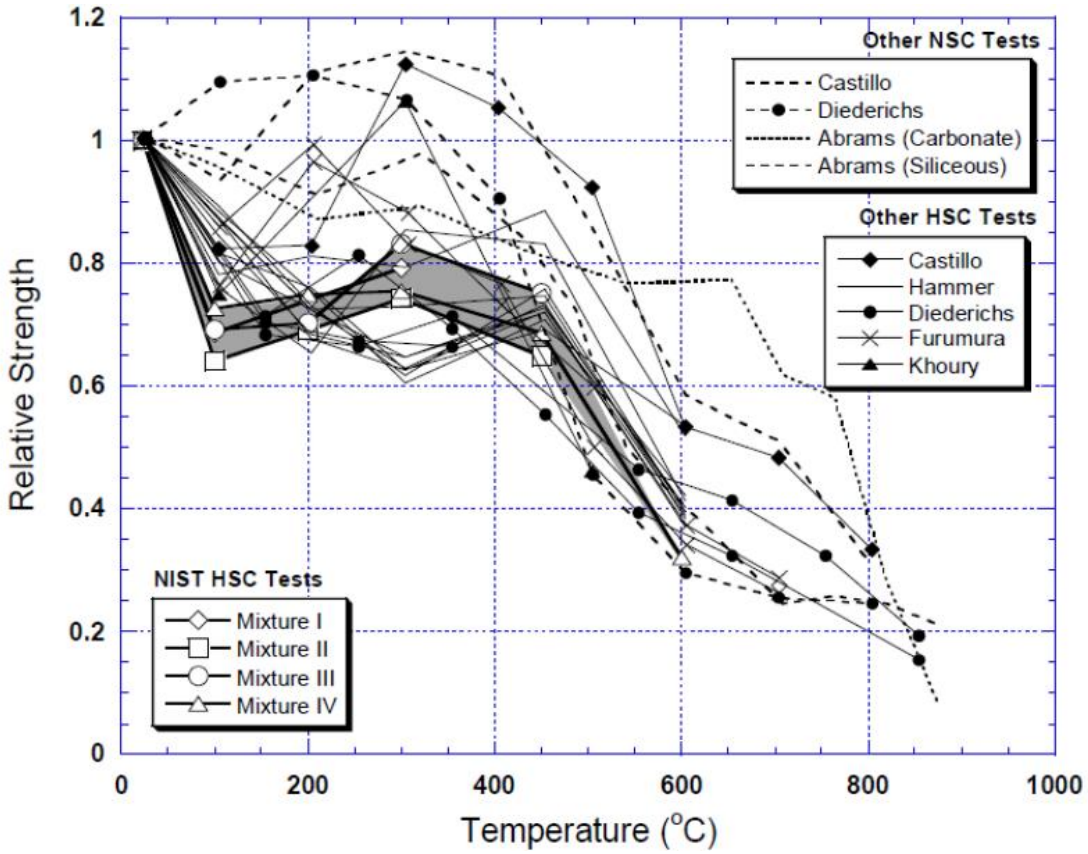


Figure I.7 : Evolution de la résistance en compression relative des bétons avec la température [12].

Gallé [15] a montré que les résistances résiduelles d'un béton chauffé avec une vitesse de 0,1°C/min sont inférieures que celles d'un béton chauffé avec une vitesse de 1°C/min ou 10°C/min. Dans cette étude nous avons utilisé la même vitesse de 5°c/ min.

Galle [15] a également comparé le module d'élasticité résiduel des bétons chauffés à une vitesse de 0.1°C/min à ceux des bétons chauffés à 1°C/min et 10°C/min et il a constaté que la diminution du module d'élasticité est plus importante pour le béton chauffé avec une vitesse de 10°C/min que pour les mêmes bétons chauffés à une vitesse de 0,1°C/min et 1°C/min. La variation relative entre les valeurs de module d'élasticité chauffé à 0,1°C/min et 10°C/min est de 9%.

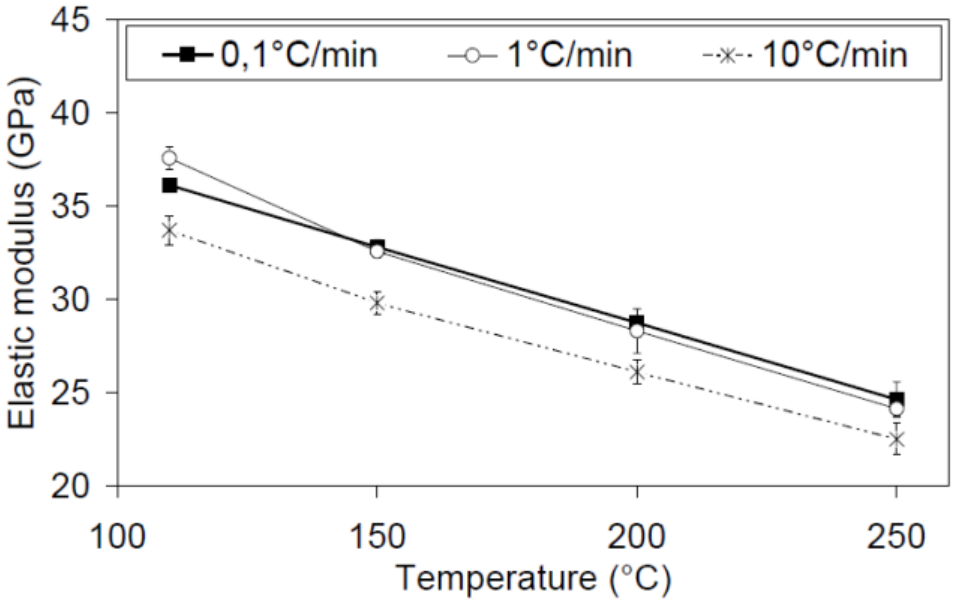


Figure I.8 : Module d'élasticité résiduel du béton chauffé à une vitesse de 0.1°C/min, 1°C/min et 10°C/min à différentes températures [15]

I.7. Comportement des structures en béton armé poste incendie

La sécurité et la serviabilité des structures en béton ne peuvent pas être réalisées sans la connaissance complète des propriétés fondamentales des matériaux et les conditions de service aux quelles la structure sera soumise. Lorsque la structure en béton armé est exposée au feu, le béton perd graduellement sa résistance mécanique et il se dégrade régulièrement de l'extérieur vers le cœur. Cependant, ce processus de dégradation est suffisamment lent et progressif pour permettre un maintien de la stabilité des structures pendant un laps de temps, le plus souvent, suffisant à l'évacuation des personnes, mais aussi, pour permettre de retrouver après extinction de l'incendie un ouvrage endommagé mais réparable [16].

La première véritable analyse des risques d'instabilité thermique revient à Gary en 1916 [17]. Celui-ci a proposé le premier une définition et une classification des types d'instabilité. Or l'instabilité thermique augmente le risque de ruine de la structure exposée au feu en jouant sur deux paramètres à la fois la perte de la résistance, la section résistante et la perte de protection des armatures d'acier.

I.8. Conclusion

Nous venons de présenter dans ce chapitre les conditions accidentelles dans lesquelles l'instabilité thermique des bétons peut être observée. Bien entendu, ces conditions particulières constituent le cadre général de ce mémoire. Cependant, l'étude du phénomène d'instabilité thermique des structures en béton ne peut être effectuée sans l'apport de l'expérimentation. Cela nous permettra de faire une liaison entre notre étude expérimentale de l'influence des gros granulats sur les instabilités thermiques des structures en béton et les principaux résultats de nombreuses décennies de recherche.

CHAPITRE II. METHODOLOGIE DE L'ETUDE EXPERMENTALE

II.1. Introduction

Les travaux expérimentaux menés ont pour objectif d'observer et d'évaluer les variations des caractéristiques mécaniques des bétons ainsi que leur comportement, sous l'effet des températures très élevées d'origine thermique puis soumis à un endommagement mécanique. L'essai du chargement mécanique a été fait après le refroidissement des éprouvettes jusqu'à la température ambiante. Pour réaliser notre travail de mémoire, nous avons construit un programme expérimental en fonction des contraintes de travail (préparation des corps d'épreuves, disponibilité des équipements expérimentaux et la durée du mémoire).

II.2. Caractéristiques de chaque composant du béton

Pour cette étude, il a été choisi de fabriquer les différents bétons à partir d'un squelette granulaire issu d'un mélange tertiaire de gravier, de gravillon et de sable, d'un ciment, de l'eau. Et pour pouvoir étudier l'influence de la nature des constituants sur le comportement des différents types de bétons soumis à haute température, des Béton Ordinaires contenant des granulats de rivière et d'autres contenant des granulats de carrières concassée ont été également étudiés.

II.2.1. Ciment

Depuis l'introduction de la norme européenne sur le ciment surtout en Europe, l'assortiment des ciments de l'industrie cimentière européenne s'est déplacé des ciments Portland purs CEM I vers les ciments Portland composés CEM II, c'est à dire des ciments qui contiennent, mis à part le clinker, d'autres constituants minéraux. Le recours plus fréquent à d'autres constituants principaux comme le calcaire, le schiste calciné, la cendre volante, fume de silice ou le laitier pour la fabrication du ciment comporte divers avantages: la diminution de la part du clinker réduit d'une part les émissions de gaz carbonique et permet d'autre part de préserver les réserves de matières premières. Par ailleurs, le développement de ciments des types CEM II et CEM III permet aux utilisateurs d'optimiser les propriétés du béton en termes d'ouvrabilité, de chaleur d'hydratation, de durabilité, etc.

Le ciment utilisé dans le présent projet est le ciment de résistance 32.5R qui a une surface spécifique Blaine égale à 3585cm^2/g et une densité de 3,1. Il contient au moins 95 % de clinker et 5 % de constituants secondaires.

II.2.2. L'eau

L'eau utilisée doit absolument être propre et ne doit pas être ajoutée avec excès. Si ces deux conditions ne sont pas respectées, le béton risque d'être fragile et ses performances seront altérées. La résistance finale d'un béton dépend du rapport E/C (masse d'eau / masse de ciment) du mélange.

De plus, le rapport E/C d'un béton courant varie entre 0.4 (qualité supérieure) et 0.6 (béton de fondation). L'eau de gâchage utilisée est celle du réseau de distribution en eau potable de la REGIDESO du quartier KIRIRI dont la masse volumique est égale à 1000 kg/m^3.

II.2.3. Le sable

La classe granulaire du sable utilisé est 0/4. Le choix du sable utilisé pour la confection des deux catégories de béton est guidé par l'objectif de cette étude visant à estimer l'influence des gros granulats sur le comportement des bétons à haute température. Nous avons donc choisi un seul type de sable naturel de classe granulométrique (0/4) qui provient de la rivière MUGERE séparant la commune MUHA et KABEZI. Il s'agit d'un sable alluvionnaire. Les principales propriétés physiques de ce sable sont présentées dans le tableau II.1.

Tableau II-1. Paramètres physiques du sable utilisé.

Paramètre physique	**valeur**
Masse volumique apparente (kg/m^3)	1550
Masse volumique absolu (kg/m^3)	2500
Module de finesse	2.525
Compacité (%)	62
Equivalent de sable (%)	76

II.2.4. Le gravier

Pour pouvoir étudier l'impact des gros granulats sur le comportement des bétons soumis à température élevée, les graviers concassés provenant des massifs de la carrière du site d'extraction de la colline Gakungwe en commune Kabezi, Province BUJUMBURA et des graviers de la rivière MUGERE ont été également utilisés. Leurs principales caractéristiques sont présentées dans le tableau II.2.



Figure II.1 : Graviers de la rivière MUGERE.



Figure II.2 : Gravier concassés des carrières de Gakungwe

Tableau II-2. Paramètres physiques du Gravier utilisé.

Propriétés	Gravier de la rivière (5/25) MUGERE	Gravier concassés (5/25) de GAKUNGWE
Masse volumique absolue (g/cm3)	2.12	2,61
Masse volumique apparente (g/cm3)	1.50	1.70
Coefficient Los Angeles (%)	60	51,98

II.3. Formulations des bétons d'étude

La formulation joue un rôle important qui consiste à choisir des proportions de chacun des constituants d'un béton afin d'obtenir les propriétés mécaniques et de mise en œuvre. De même, à chaque environnement donné, une résistance garantie à 28 jours sur éprouvettes sera exigée aux producteurs, pouvant justifier des dosages de ciments plus ou moins supérieurs à la recommandation de la norme, et basée sur l'expérience propre à chaque entreprise, laquelle étant dépendante de ses matières premières dont la masse volumique peut varier, notamment celle des granulats. L'étude de la composition d'un béton consiste à définir le mélange optimal des différents granulats dont on dispose selon les propriétés du béton recherchées pour la construction de l'ouvrage.

Les méthodes proposées sont nombreuses mais tous aboutissent à des dosages **volumétriques** ou, de préférence, **pondéraux**, le passage de l'un à l'autre pouvant se faire, si nécessaire, par la connaissance de la densité apparente des granulats en vrac.

L'intérêt de cette étude est d'utiliser des bétons de références ayant des caractéristiques proches de celles des bétons utilisés dans des structures de notre Pays ayant subi des situations extrêmes (incendie) et qui ont été endommagées par l'effet de l'augmentation de la température. De point de vue résistance mécanique nous avons essayé d'être dans une plage de résistance des bétons normaux utilisés dans les bâtiments (25 MPa).

Les formulations des bétons sont obtenues suivant la méthode DREUX-GORISSE [18]. Les affaissements au cône d'Abrams des bétons étudiés sont égal à 8 cm. Cela correspond à un béton plastique nécessitant une vibration normale.

II.4. Confection des échantillons de Béton

La présente étude s'est limitée sur l'étude des propriétés mécaniques des bétons à hautes températures de deux types de gros granulats :

- un béton ordinaire confectionné avec des granulats de la rivière MUGERE séparant la commune MUHA de Bujumbura mairie et la commune KABEZI de la province Bujumbura (**BO_GR**).

- un béton ordinaire confectionné avec des granulats concassés des carrières de GAKUNGWE en commune KABEZI (**BO_GC**)

Les éprouvettes de béton ont été confectionnées au Laboratoire de Matériaux de la Faculté des Sciences de l'Ingénieur (FSI) de l'Université du Burundi.

Pour chaque composition du béton, cinquante-quatre (54) échantillons de 10x10x10 cm^3, issues d'une même gâchée ont été confectionnées.

Les constituants du béton étaient introduit dans la gâchée par ordre décroissant de granulométrie, et ont été mélangés à sec jusqu'à l'homogénéisation. L'eau a été introduite par après et le malaxage a été poursuivi durant environ 5 minutes.

Ils sont préparés par gâchée d'environ 60 litres et sont coulés dans des moules cubiques

Les bétons sont mis en place par vibration à l'aide de la table vibrante. Les figures II.3 et II.4 montre respectivement les photos des moules et l'équipement de vibration (table vibrante).



Figure II.3 : Moules 10 X 10 X10 cm utilisés pour la confection des échantillons



Figure II.4 : Equipement de compactage du béton (Table vibrante)

La méthodologie utilisée dans la confection des éprouvettes est résumée sur figureII.3 ci-après :

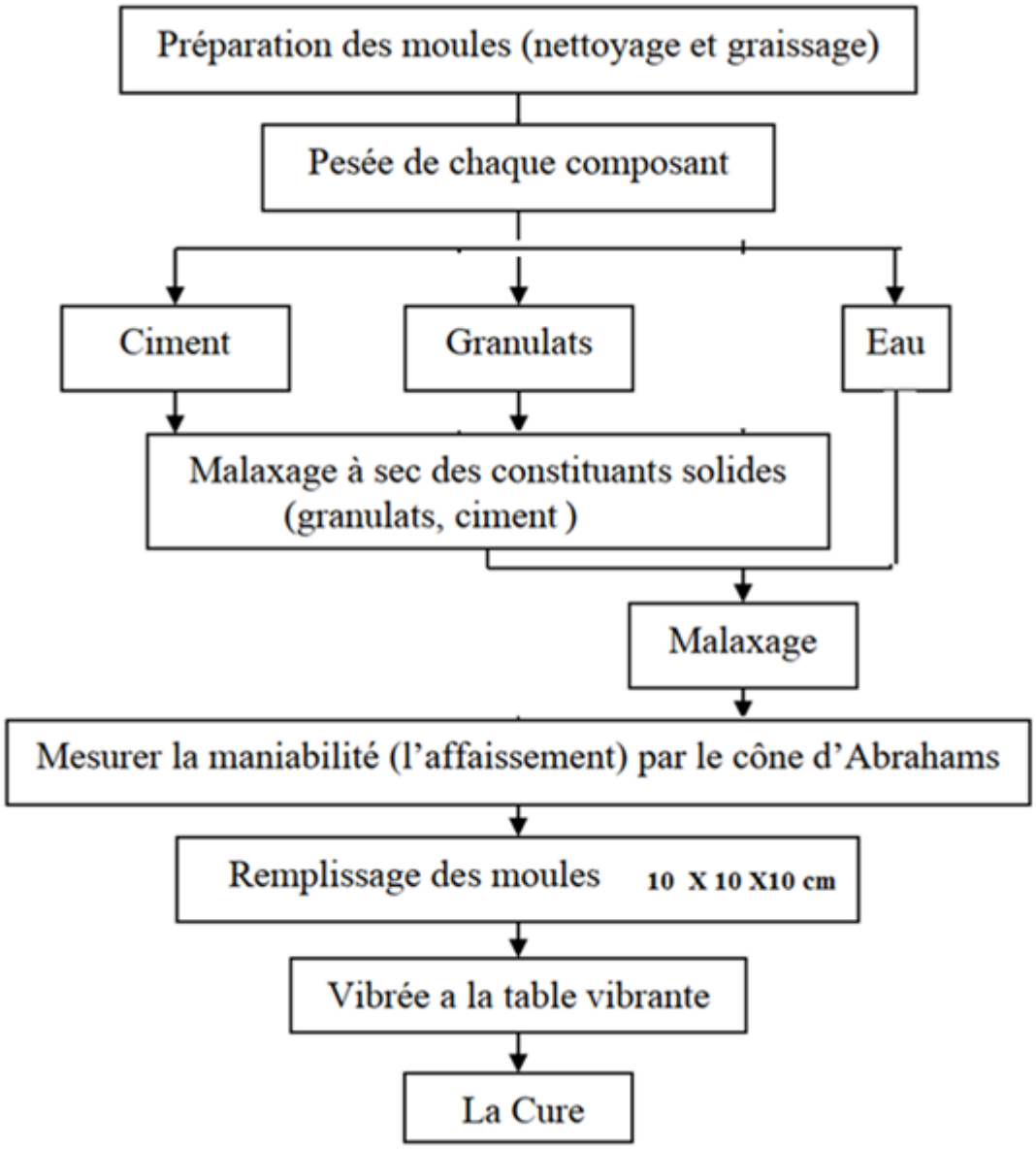


Figure II.5 : organigramme de fabrication des éprouvettes

Toutes les éprouvettes utilisées dans cette campagne expérimentale ont suivi la même cure.

Après démoulage, les éprouvettes ont été conservées pendant 24 heures dans leur moule à température ambiante (≈20)°C. A l'issue de ce temps de conservation initiale, elles ont été démoulées, puis plongées dans l'eau à 20°C pendant 28 jours. Ce mode de conservation permet d'assurer l'hydratation du béton et d'éviter toute fissuration due à la dessiccation. Il permet également de maintenir les bétons saturés et de se rapprocher ainsi des conditions réelles qu'on peut rencontrer dans certains ouvrages souterrains (le cas de fondations).



Figure II.6 : Conservation des éprouvettes immergées dans l'eau.

A l'issue du temps de cure dans l'eau, les éprouvettes ont été stockées à l'air ambiant pendant une journée afin de diminuer les gradients hydriques et thermiques dans les éprouvettes pour diminuer en conséquence l'endommagement des éprouvettes lors du traitement thermique.

II.5. Essai de Chauffage

Pour étudier le comportement à haute température du béton, il est nécessaire de lui faire subir différents cycles thermiques. L'échauffement rapide avec les vitesses de montée en température très importantes provoque des contraintes thermiques dues aux gradients thermiques. Les vitesses de chauffage comprises entre 1 et 5°C/min n'ont pas d'influence sur le caractère explosif du béton [19].Nous avons choisi, pour la sollicitation thermique des éprouvettes, d'appliquer une vitesse de chauffage moyenne de 5°C/min pour tous les bétons.

La gamme de température retenue pour nos essais s'étend de la température ambiante à 900°C. Cette amplitude couvre les températures pour lesquelles les principales transformations physico-chimiques des bétons s'observent. Par ailleurs, cela correspond aussi aux capacités des moyens expérimentaux utilisés.

Afin de réaliser les cycles de chauffage, un four électrique **Heraeus M104** programmable de dimensions intérieures 13x12x270 cm^3 et dont la température peut atteindre une valeur de 1000°C a été utilisé (Figure II.7 et 8). Ce four permet le chauffage de deux éprouvettes cubiques de dimensions 10x10x10 cm en même temps.



Figure II.7 : À gauche, photo du four électrique Haraeus M104



Figure II.8 : environnement intérieure du four programmé à 900

Afin de pouvoir déterminer l'évolution de la résistance des deux types de bétons en fonction de la température, nous avons fait subir aux éprouvettes des différents traitements thermiques aux températures de 250 °C, 350 °C, 450 °C, 600 °C et 900°C. Les éprouvettes de béton subissent des cycles de chauffages et de refroidissement composés d'une phase de montée en température, d'une phase de stabilisation à la température constante (palier) et d'une troisième phase de refroidissement jusqu'à température ambiante.

Pour chaque température et pour chaque formulation de béton, neuf (09) éprouvettes ont été testées à l'allure de chauffage d'une vitesse de 5°C/min.

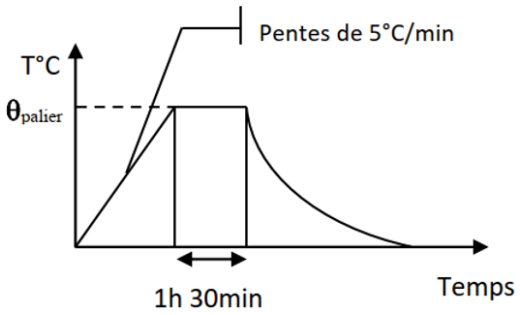


Figure II.9 : Allure des cycles de chauffage-refroidissement [20].

Le choix des températures était pris selon les transformations endothermiques observés à chaque température [20].

- **20°C :** cette température est considérée comme étant la température de référence.
- **250°C** : à cette température, la déshydratation des CSH est dans un état avancé.
- **450°C :** à cette température, les CSH sont déshydratés et la portlandite est encore dans son état initial d'hydratation.
- **600°C :** la portlandite est décomposée à cette température et l'éventuelle transformation du quartz-α en quartz-β est atteinte (575 °C).
- **900°C :** destruction du béton est l'apparition des fissures.

Toutes les éprouvettes retenues pour cette étude sont testées après leur refroidissement. Nous appliquons cinq cycles de chauffage-refroidissement de 20°C à différentes températures de palier : 250°C, 450°C, 600°C et 900°C. Chaque cycle de chauffage-refroidissement se compose de trois phases, une phase de montée en température, une phase de stabilisation à température constante (1h30minuté) et une troisième phase de descente de la température du palier à la température ambiante.

Tableau II-3 : Temps de chauffage en fonction de la température

T°C	Temps de chauffage (T1)	Temps de stabilisation du four (T2)	Temps de refroidissement (T3)
20°C	-	-	-
250°C	50min	1h30min	De la température de chauffage jusqu'à la température ambiant (T3 est variable)
350°C	1h10min	1h30min	
450°C	1h30min	1h30min	
600°C	2h	1h30min	
900°C	3h	1h30min	

II.6. Essais macrostructuraux

A la suite des essais thermiques, les éprouvettes sont sorties du four et préparées pour subir des essais mécaniques de compression. Ces essais permettent d'observer l'évolution des propriétés physiques et mécaniques résiduelles des matériaux avec l'élévation de la température.

L'application de la charge mécanique est effectuée via une presse hydraulique de capacité 1500 KN. La vitesse de chargement est gardée constante durant toute la durée de l'essai grâce au cadencemètre de la presse hydraulique (5 KN/s). La charge de compression est appliquée jusqu'à rupture de l'éprouvette. La charge appliquée dans le temps et la contrainte maximale de rupture sont enregistrées.



Figure II.10 : Presse hydraulique programmable



Figure II.11 : Programmation de l'essai de compression

Toutes les éprouvettes sont chargées jusqu'à l'endommagement à la contrainte maximum, cet endommagement se traduit par la propagation de microfissures dans le matériau avec un chargement d'une vitesse constante de 5 KN/S.



[DATA]
Test: ALPHANUMERICVALUE
Test type: Compression test
Test date: 9/7/2021
Test time: 2:07:16 AM

Channel number: 1
Rate: 5.000 kN/sec
Start load: 1500.000 kN
Stop load: 10 %
Area: 10000.000 mm²

[RESULTS]
MANUAL STOP
Maximum load: 199.627 kN
Maximum strength: 19.963 MPa

[GRAPHINFO]
Axis0=2;0.000;60.000;0;0;0
Axis1=1;0.000;300.000;255;0;65535
Graph1=0;1

[GRAPH]

Time [sec]	Load [kN]
0.050	3.050
0.100	3.050
0.150	3.087

Figure II.12 : Aperçus de la propagation des microfissures dans l'éprouvette et format des résultats obtenus après écrasement

Pour chacun des deux types de béton étudiés (Béton à granulats de rivière et béton à granulats concassés de carrière), 54 éprouvettes ont été écrasées.

Les contraintes d'écrasement et les déformations de l'éprouvette sont électroniquement enregistrées sur flash disque à l'aide de la machine. Après traitement en Excel nous avons obtenu les courbes de contrainte déformation des éprouvettes écrasés.

L'organigramme exposé ci-après montre la méthodologie utilisé et la réparation des éprouvettes par température de chauffage :

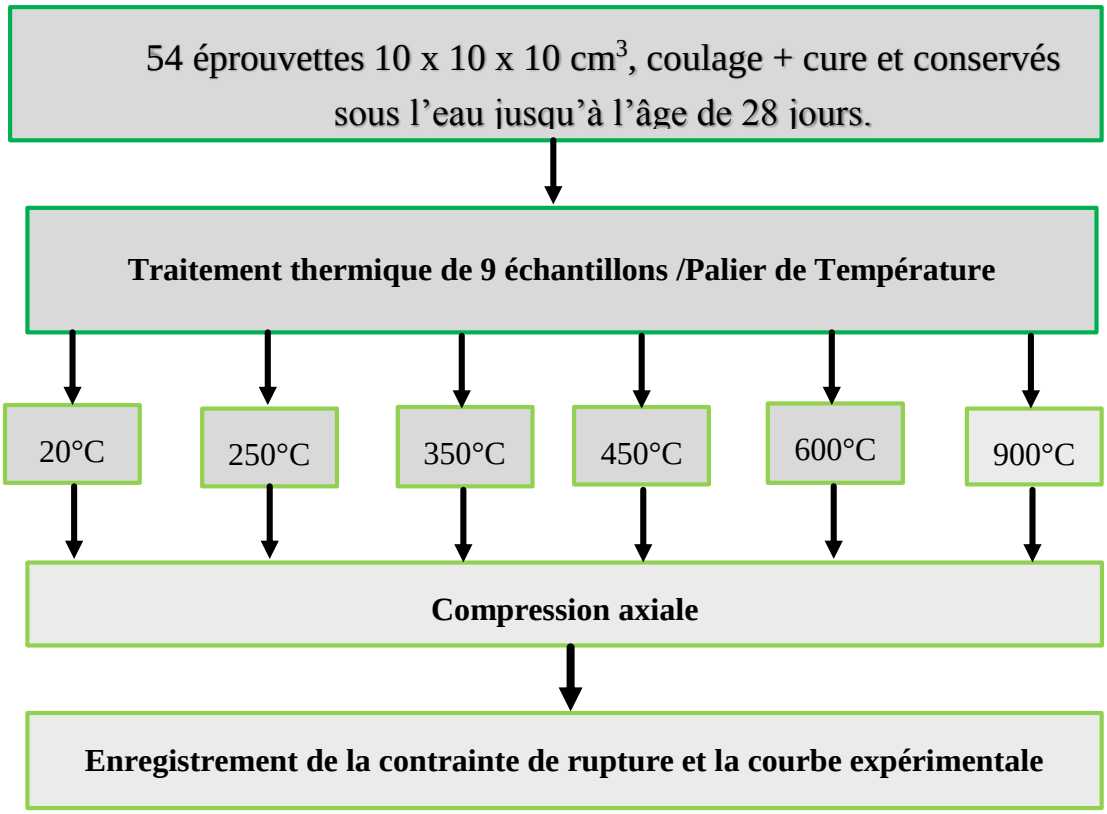


Figure II.13 : Organigramme des étapes expérimentales

II.7. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différents matériaux utilisés dans le cadre de cette étude. Le détail de la méthodologie utilisé pour chaque essai a été présenté dans cette partie. Notre étude est principalement menée sur un béton ordinaire de gravier de rivière et un béton ordinaire de gravier concassé des carrières. Ces différentes formulations seront utilisées dans la suite pour analyser l'impact moyenne des matériaux locaux sur la portance structurelle des bâtiments post-incendie. : Études des propriétés physiques et mécaniques en fonction de la température.

CHAPITRE III. PRESENTATION ET ANALYSE DES RESULTATS

III.1. Introduction

Dans le chapitre précédent, nous avons présenté les matériaux, les matériels et les protocoles expérimentaux retenus pour l'étude de l'impact des matériaux locaux sur la portance structurelle des bâtiments en béton armé post-incendie. Dans ce chapitre, nous présentons les résultats expérimentaux des tests réalisés sur deux familles de bétons : Béton Ordinaire confectionné avec de gravier de Rivière (BO_GR) et les Bétons Ordinaire de Gravier concassés des carrières (BO_GC).

Dans un premier temps, nous présentons une analyse des propriétés physiques et des observations macroscopiques des différents types de béton utilisés et après leurs expositions à des cycles de chauffage-refroidissement. En deuxième lieu, nous présentons et discutons les résultats obtenus pour les propriétés physiques et mécaniques des deux familles de bétons. Le dernier paragraphe est consacré à l'évaluation probable des dégradations des bétons en fonction de la température de chauffage.

III.2. Résultats de l'analyse granulométrique des granulats

Lorsque les granulats sont soumis à une élévation de température, ils peuvent présenter des instabilités thermiques (modifications minéralogique et dilatation thermique) qui influencent fortement le comportement du béton gâché avec ces granulats lors d'une élévation de la température. Donc, il est important de connaître la granulométrie et le comportement des granulats à haute température si possible (cette analyse n'a pas été faite suite au manque des casseroles de grande résistance à la température qu'on peut introduire dans les fours).

Cette partie porte sur l'analyse granulométrique. Les résultats obtenus apportent plus de connaissance des modifications induites sur les granulats par sa granulométrie (Tableau III.1 et III.2).

Tableau III-1 : Granulométrie du sable de la rivière MUGERE

Diamètre des tamis (mm)	Refus cumulé (g)	Refus cumulé (%)	Passant (%)
4	30	1.5	98.5
2	80	4	96
1	290	14.5	85.5
0.5	990	49.5	50.5
0.25	1730	86.5	13.5
0.125	1930	96.5	3.5
0.063	1980	99	1
Fond	2000	100	0

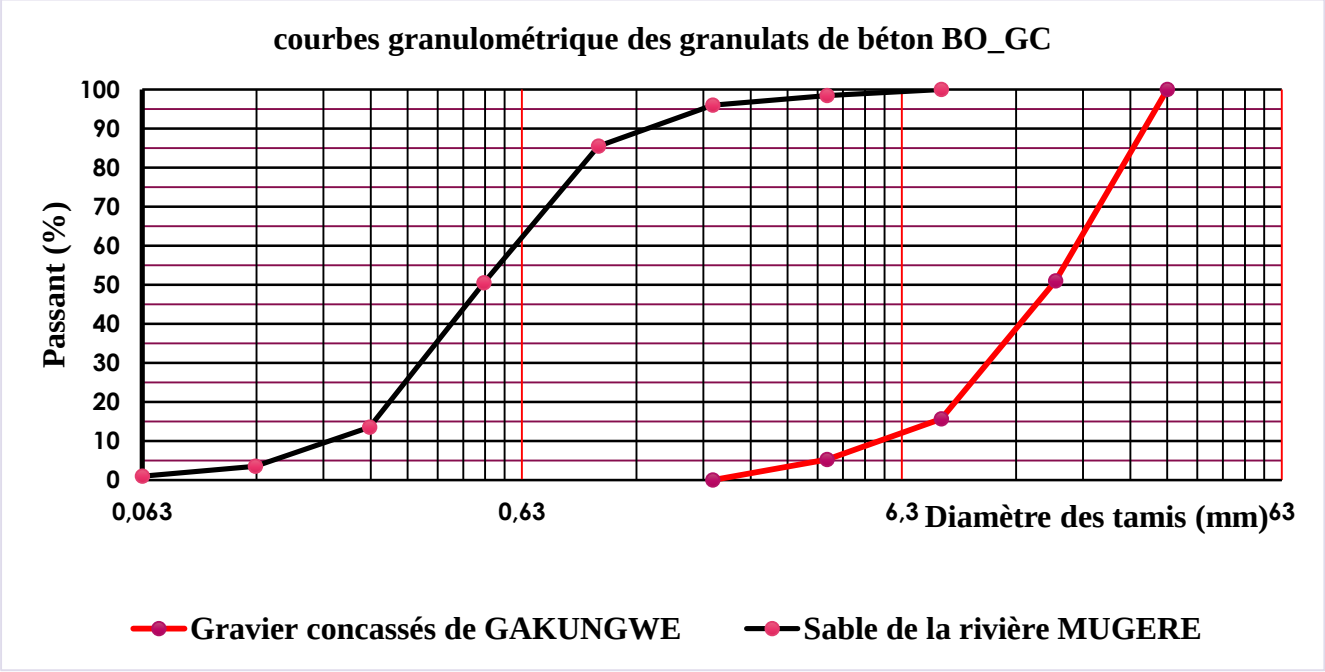
Tableau III-2 : Résultats de l'analyse granulométrique des deux catégories de graviers

Type de gravier	**Gravier roulés de MUGERE (GR)**		**Gravier Concassés de KABEZI (GC)**	
Diamètre des tamis (mm)	**Refus cumulé (%)**	**Passant (%)**	**Refus cumulé (%)**	**Passant (%)**
31.5	0.00	100.00	0.00	100.00
16	55.00	45.00	51.43	48.57
8	96.00	4.00	88.57	11.43
4	99.00	1.00	99.52	0.48
2	99.90	0.10	100.00	0.00

Les granulats employés pour le béton peuvent contenir des impuretés (argile, matières organiques…etc) qui perturbent l'hydratation du ciment et entraînent une mauvaise adhérence entre les granulats et la pâte. Ceci se vérifie sur le chantier par les traces qu'elles laissent lorsqu'on les frotte entre les mains. Le degré de propreté est déterminé à l'aide de l'essai d'équivalent de sable. Un bon sable à béton doit avoir environ un tiers de ses grains compris entre 0,250 et 0,500 mm. Notre sable est un sable de bonne qualité.

L' analyse granulométrique a montré que les grains de notre sable comprise entre 0.25 et 0.5mm sont égale à 50.05 % (donc supérieur à 1/3) avec un module de finesse de 2.525 (la norme recommande un modure de fisse compris entre 1.8 et 3.2).

Lorsqu'une classe granulaire fait partiellement ou totalement défaut dans un mélange, on parle de granularité « discontinue ». A l'endroit de la classe manquante, la granularité (courbe granulométrique) est caractérisée par un palier horizontal ou légèrement incliné.En général, on cherche à avoir une courbe continue, ce qui est favorable à une bonne ouvrabilité des bétons.Les courbes granulométriques ci-après montrent que les granulats locaux remplissent toutes les conditions normales pour la confection des bétons(courbes continue).



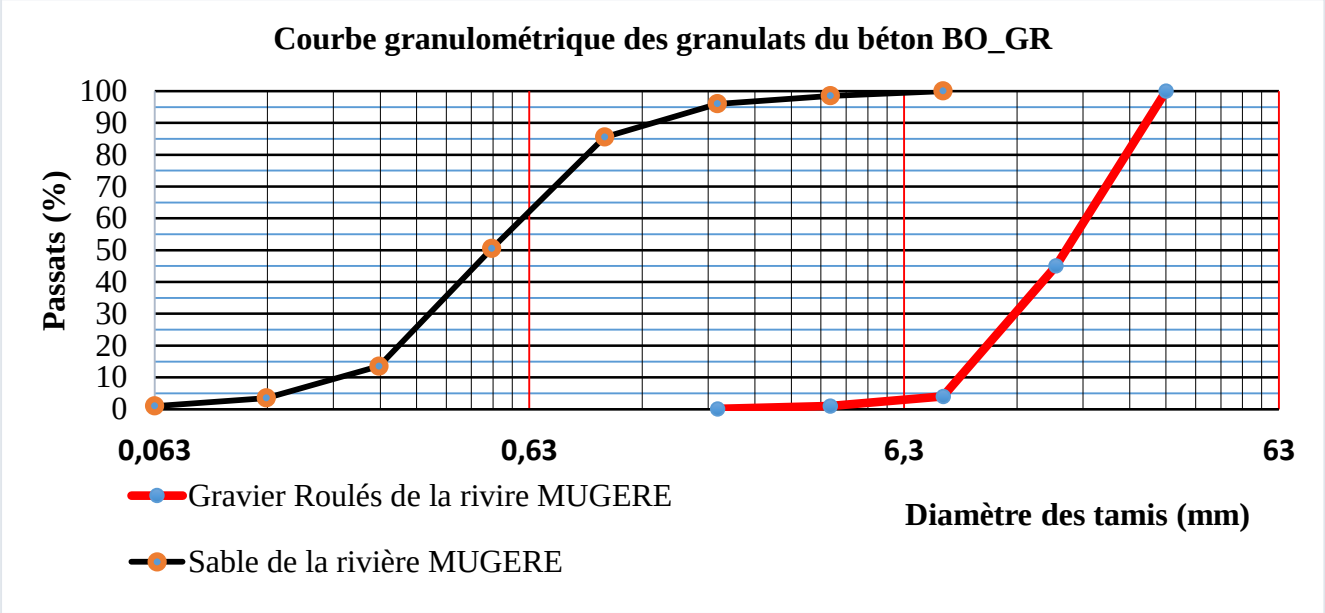


Figure III.1 : Courbes granulométriques des granulats utilisés.

III.3. Résultats de la formulation du béton

Les ouvrages que l'on construit aujourd'hui au Burundi en béton sont des plus divers tant dans leur destination que dans leurs dimensions et toute étude de composition de béton doit en tenir compte ; il convient donc d'en définir les critères qui devront constituer clairement les données de l'énoncé du problème que pose l'étude de la composition d'un béton destiné à un ouvrage donné.

Tableau III-3 : Données de base pour la formulation du béton

Paramètre calculé	**Formule**	**Béton à GR (BO_GR)**	**Béton à GC (BO_GC)**
Résistance caractéristique : $\boldsymbol{f_{c28}}$(Mpa)	$\boldsymbol{f_{c28}}$	25	25
Résistance moyenne sur les cubes :R'28 (Mpa)	$R'_{28} = 1.2 * f_{c28}$	30	30
classe de résistance commerciale du ciment utilisé : σ_c (Mpa)	CMI 32.5	32.5	32.5
Classe de résistance réel du ciment : σ'_c (Mpa)	$\sigma'_c = 1.2 * \sigma_c$	39	39
Diamètre maximal du granulat (mm)	D_{max}	31.5	31.5
Coefficient granulaire (granulat bonne, courante avec Dmax =31.5 cm)	G	0.55	0.55
Rapport C/E	$\frac{C}{E} = \frac{R'_{28}}{\sigma'_c G} + 0.5$	1.67	1.67
Contrôle du rapport E/C selon la norme NF-EN-206/CN	$\frac{E}{C} < 0.65$	La condition est vérifiée (E/C=0.6)	La condition est vérifiée (E/C=0.6)
Affaissement en cm (pour un béton plastique nécessitant une vibration normale)	6cm < A <9cm	8	8

a) Quantité du ciment C et de la quantité d'eau E

L'abaque montre que la quantité de ciment est estimer à 350 kg/m^3 en fonction du rapport C/E =1.67≈1.7 et de l'ouvrabilité désirée (béton plastique d'affaissement A= 8 cm)

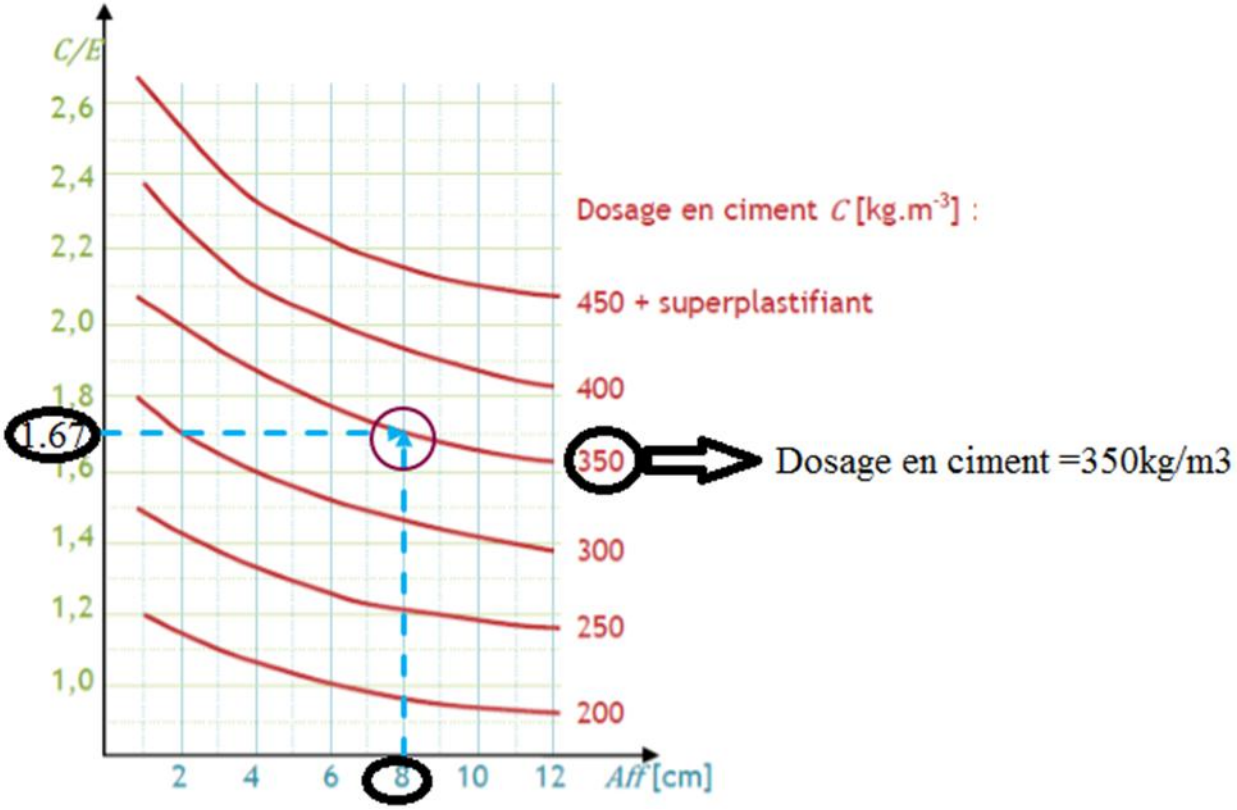


Figure III.2 : Abaque d'estimation du dosage en ciment [18].

La quantité d'eau nécessaire E est de 209.58 l/m^3 (ou kg/m^3) avec :

$$\boldsymbol{E = \frac{C}{C/E}\ (Kg)}\textbf{=209.58kg/m}^3$$

Toutefois, pour une appréciation un peu moins aléatoire, on fait une première correction en fonction de la dimension des granulats, pour tenir compte de leur surface spécifique, en appliquant la correction indiquée au tableau ci-après :

Tableau III-4 : Correction sur le dosage en eau en fonction de la dimension maximale D des granulats (si D ≠25 mm)

Dimension maximale des granulats (mm)	5	10	16	25	40	63	100
Correction sur le dosage en eau (%)	+15	+9	+4	0	-4	-8	-12

La correction est à apporter au dosage d'eau si la dimension maximale des granulats est différente de 25 mm ; En effet, Nos granulats ont un diamètre maximal D_{Max} =31.5mm (25<D< 40 mm) d'où il faut légèrement minorer le dosage en eau (100%-4%) :

E= 0.96*209.58 kg/m^3= 201.197 kg/m^3

b) Recherche de la quantité des granulats

Courbe granulaire de référence : Sur le graphique d'analyse granulométrique respectant la norme NF-EN-933-1 , on trace une composition granulaire de référence O A B (figure III.3). 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%. Le point de brisure A, est déterminé par :

$X_A = 5 + \frac{D_{Max}}{2} =$ (D_{Max} >20 mm)

$Y_A = 50 - \sqrt{D_{Max}} + K$

K, le coefficient correcteur dépend du dosage en ciment, de l'efficacité du serrage, de la forme des granulats roulés ou concassés (le sable ayant une influence prépondérante) et du module de finesse du sable. Dans cette étude, les granulats sont de deux catégories (roulées et concassés) , la puissance de la vibration est normale et le dosage en ciment C de 350kg/m^3 d'où :

Les valeurs de K pour les granulats roulés et concassés sont respectivement pris égales zéro(0) et deux (+2) pour un même dosage (350 kg/m3)et une même vibration (normale) et le fait que le béton n'est pas pompé on n'aura pas de correction supplémentaire (Kp=0)

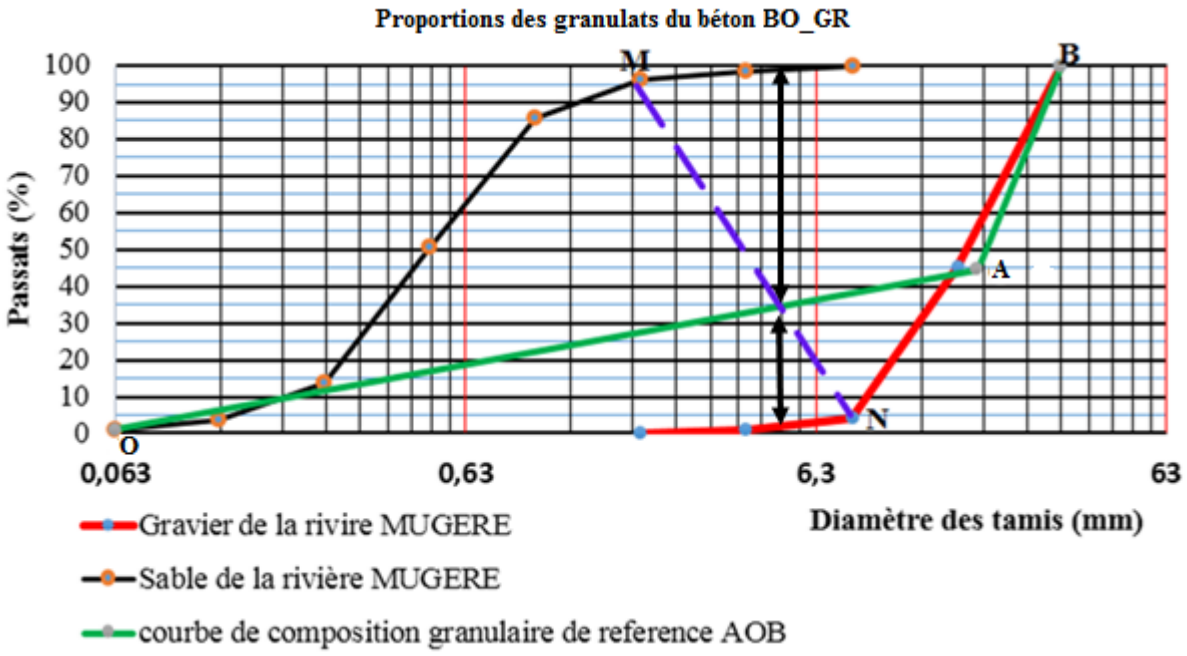
Etant donné que le sable utilisé dans les deux cas est le même le module de finesse resté inchangé

$$MFG = \frac{\sum refus\ cummulés\ \{0.125; 0.25; 0.5; 1; 2; 4\})}{100}$$
$$= 2.525\ (courbe\ granulomètrique\ du\ sable)$$

Tableau III-5 : coordonnées de la courbe de référence

Désignation	**Angularité des granulats**	
	De rivière (GR)	Concassés des carrières(GC)
D_{max}	31.5	31.5
$X_A = \frac{(D_{MAX} + 5)}{2}$	18.25	18.25
K	0	+2
Module de finesse (MFG)	2.525	2.525
K_s = 6MFG - 15	0.15	0.15
$Y_A = 50 - \sqrt{D_{Max}} + K$	44.53	46.53

Le segments MN relie les points M à 95% de tamisats cumulés d'un granulat avec les points N à 5% de tamisats cumulés de la courbe granulométrique du granulat directement supérieur en dimension (le gravier).



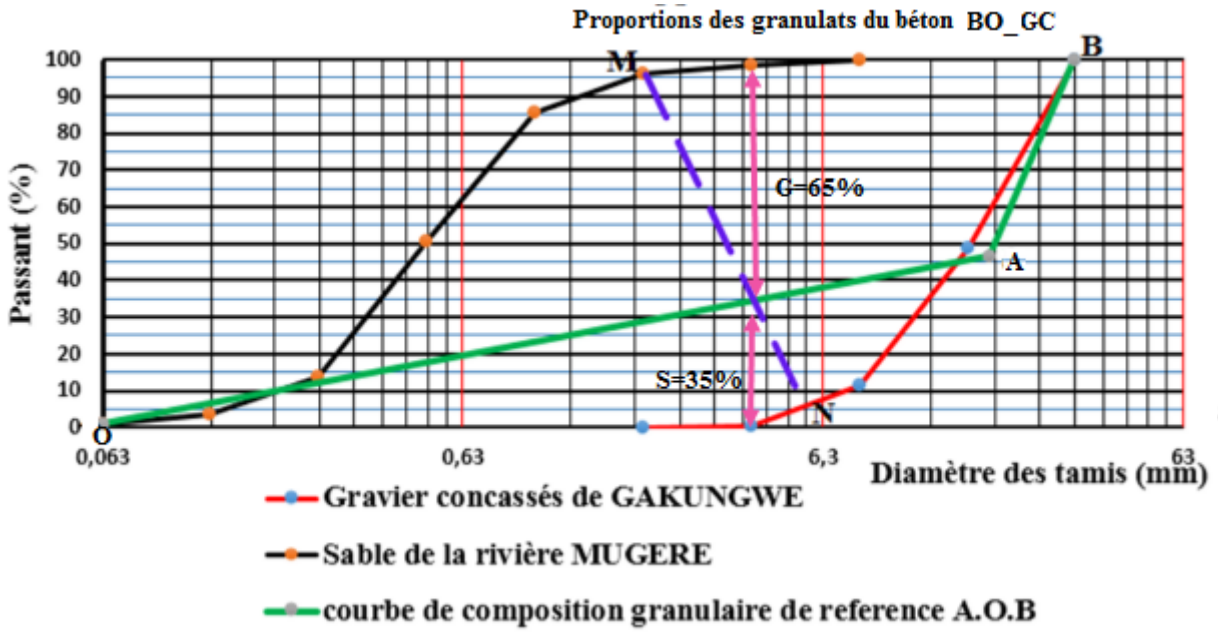


Figure III.3 : Estimation des proportions de Granulats

Cette partie de la formulation du béton propose les proportions des granulats. L'intersection de la droite MN avec la courbe de composition granulaire de référence AOB(Figure III.3) donne la proportion de sable et celui du gravier (sable=35 % et gravier =65%) pour les deux catégories de granulats .Le mélange du sable et du gravier dans ces proprtion donnnent une courbe granulométrique dons les caractéristiques sont montrées dans les tableaux (III.6 et III.7)

Tableau III-6 : coordonnées de la courbe de référence

Diamètre des tamis (mm)	Sable (35%)	Gravier (65%)	Passant (%)
31.5	35.00	65.00	100.00
16	35.00	33.16	68.16
8	35.00	10.17	45.17
4	34.48	3.39	37.87
2	33.60	0.00	33.60
1	29.93	0.00	29.93
0.5	17.68	0.00	17.68
0.25	4.73	0.00	4.73
0.125	1.23	0.00	1.23
0.063	0.35	0.00	0.35

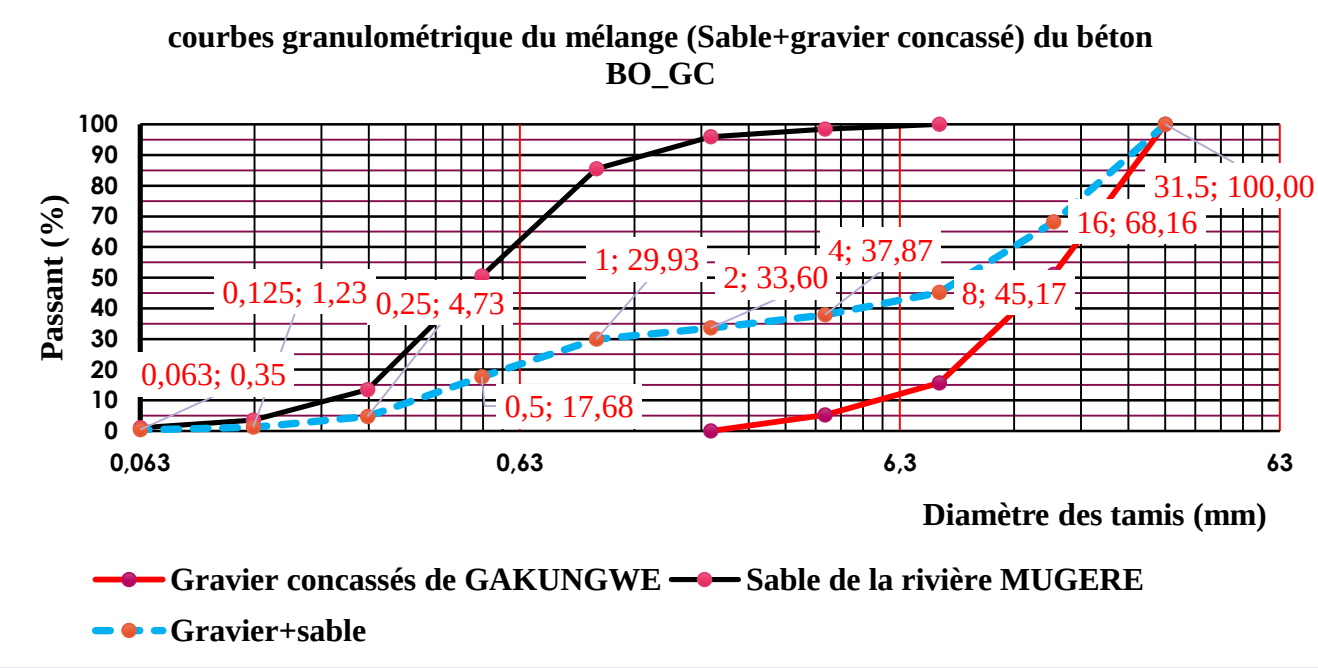


Figure III.4 : courbes granulométrique du mélange (Sable+gravier concassé) du béton BO_GC

Tableau III-7 : coordonnées de la courbe de référence

Diamètre des tamis (mm)	sable(35%)	Gravier (65%)	Passant (%)
31.50	35.00	65.00	100.00
16.00	35.00	29.25	64.25
8.00	35.00	2.60	37.60
4.00	34.48	0.65	35.13
2.00	33.60	0.07	33.67
1.00	29.93	0.00	29.93
0.50	17.68	0.00	17.68
0.25	4.73	0.00	4.73
0.13	1.23	0.00	1.23
0.06	0.35	0.00	0.35

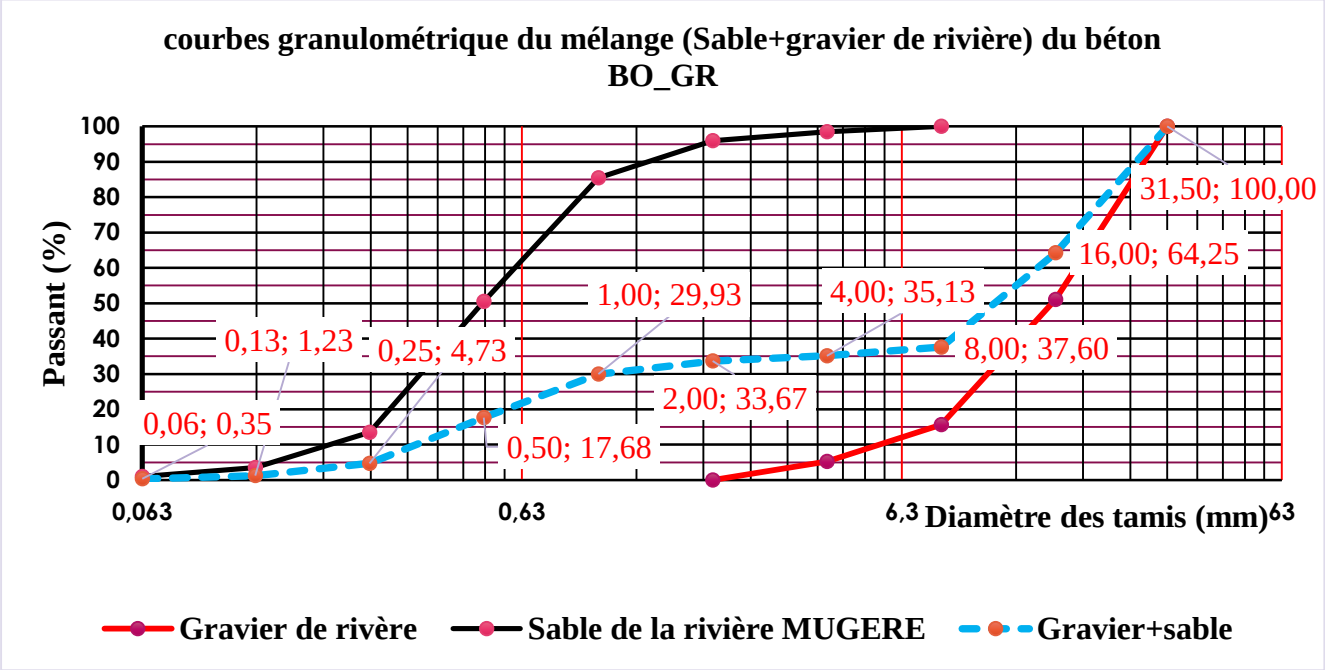


Figure III.5 : courbes granulométrique du mélange (Sable+gravier de Rivière) du béton BO_GR

Le coefficient de compacité γ_{th} permet de déduire la quantité des autres composants de la formulation. Dans cette étude , on cherche une consistance plastique, la vibration est normale et Dmax =31.5 mm d'où γ_{th}= 0.83

$V_G = \gamma_{th} - V_C = 0.83*1000 - \frac{350}{3.1} = 718.17$ litre

La formulation du béton est résumée dans le tableau III.8 :

Tableau III-8: Formulation du Béton de l'étude

Volume absolue total	Vt	830
Volume absolue du ciment	Vc	112.90
Volume absolue des granulats	Vs Granulat	717.10

Désignation	**Volume *(l)***	**Masse volumique spécifique**	**Dosage pondéral par m³ (kg/m3)**	**Dosage pondéral (kg/ éprouvette de 10x10x10cm**
Ciment	112.90	3.1	350	0.35
Eau	201.19	1	201.197	0.20
Sable (35 % du VsG)	250.98	2.6	652.56	0.65
Gravier (65%du VsG	466.11	2.6	1211.89	1.21
Total	1038.77		2423.22	2.42

III.4. Observations macroscopiques des effets de la température sur le Béton des matériaux locaux

Les observations macroscopiques des effets des sollicitations thermiques sur différents types de Béton sont faites après le refroidissement sur les cycles de chauffage à 250°C, 350, 450°C, 600°C et 900°C.

Tous les bétons sont intacts après le traitement thermique des échantillons jusqu'à 250°C, nous ne remarquons aucunes dégradations macroscopiques. À partir de 350°C, nous avons observé des changements de couleur sur quelques échantillons par rapport à l'état initial (20°C).

Les descriptions de ces changements ainsi que les photographies des échantillons avant et après le traitement thermique sont données ci-après on observe l'apparition des microfissures à partir de 600 °C de chauffage.



350°C



450°C



600°C



900°C

Figure III.6 : Photographies des échantillons avant et après exposition aux différentes températures.

La formation de la couche blanche sur les surfaces des bétons [21] est la conséquence de la décarbonatation des calcaires, la calcite (CaCO3) se transformant en chaux (CaO) suite au départ de CO2. Après refroidissement, le CaO réagit avec l'humidité de l'air et se transforme en portlandite Ca(OH)2 [22]. Après les cycles de chauffage à 450°C, 600°C et 900°C, nous avons observé que l'épaisseur de la couche décarbonatée augmente avec l'augmentation de la température. Cette épaisseur de la couche blanche est d'environ 1.0 mm après traitement thermique des échantillons à 900°C (figure III.4).

Après la simulation d'incendie par chauffage, les éprouvettes de béton d'âges égal à 28 jours, de dimensions (10x10x10) cm3 sont soumises à la compression simple. Les figures III-7 et III-8 représentent l'évolution de la résistance à la compression en fonction de la température de chauffage.

Tableau III-9 : Contraintes maximales de rupture des échantillons du Béton Ordinaire à Gravier de rivière (BO_GR) :

T◦c	N° de l'échantillon									valeur
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	moyenne(Mpa)
20	29.09	34.34	32.92	31.68	23.50	29.19	34.09	36.38	34.04	31.69
250	34.90	32.54	33.53	31.67	26.47	31.74	34.29	34.41	33.03	32.51
350	31.22	33.50	32.79	33.00	36.88	34.39	29.79	31.86	31.11	32.72
450	26.00	26.62	24.13	25.75	24.25	23.38	25.25	22.09	23.46	24.55
600	13.13	17.56	15.29	14.14	17.65	16.20	13.44	14.72	15.98	15.35
900	9.84	11.21	6.23	9.77	7.77	10.38	11.74	6.55	10.95	9.38

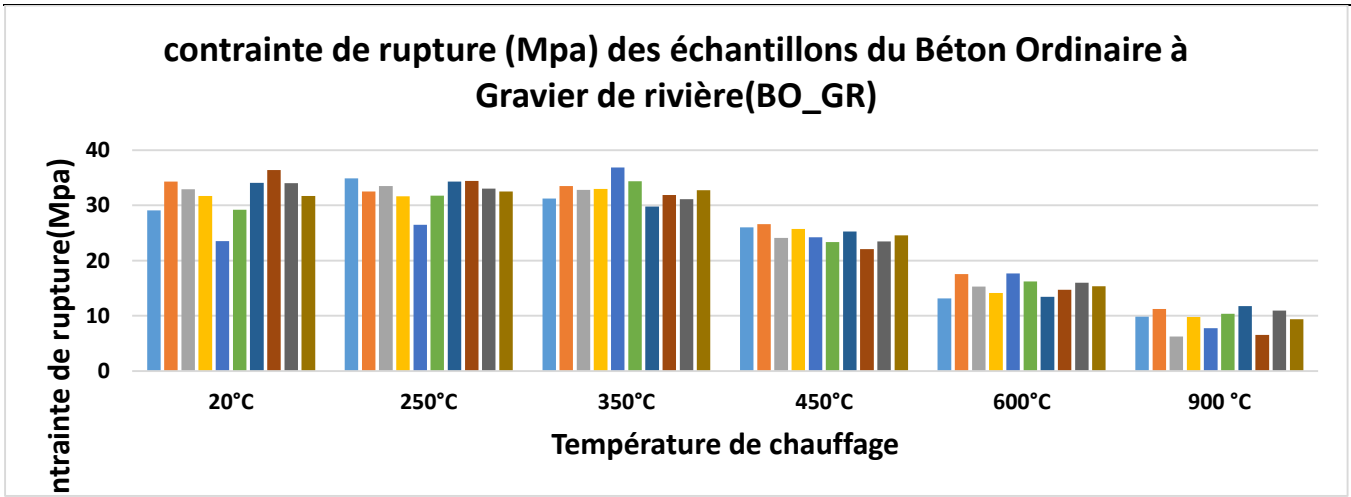


Figure III.7 : contrainte de rupture (Mpa) des échantillons du Béton Ordinaire à Gravier de rivière(BO_GR)

Tableau III-10 : Contraintes maximale de rupture des échantillons du béton Ordinaire à Graviers concassé de carrière (BO_GC)

T◦c	N° de l'échantillon									valeur moyenne(Mpa)
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
20	35.60	33.94	33.16	29.11	27.81	32.30	38.44	32.12	25.36	31.98
250	31.62	35.08	33.02	33.82	33.17	31.47	34.57	37.58	31.40	33.53
350	37.19	38.90	32.32	33.46	24.43	29.23	31.72	36.39	32.89	32.95
450	22.90	22.49	21.01	28.93	19.99	23.78	21.06	23.06	24.13	23.04
600	13.73	11.51	11.93	7.81	9.02	16.94	11.24	10.84	11.68	11.63
900	7.41	6.85	8.30	4.65	9.50	10.09	6.36	6.45	5.55	7.24

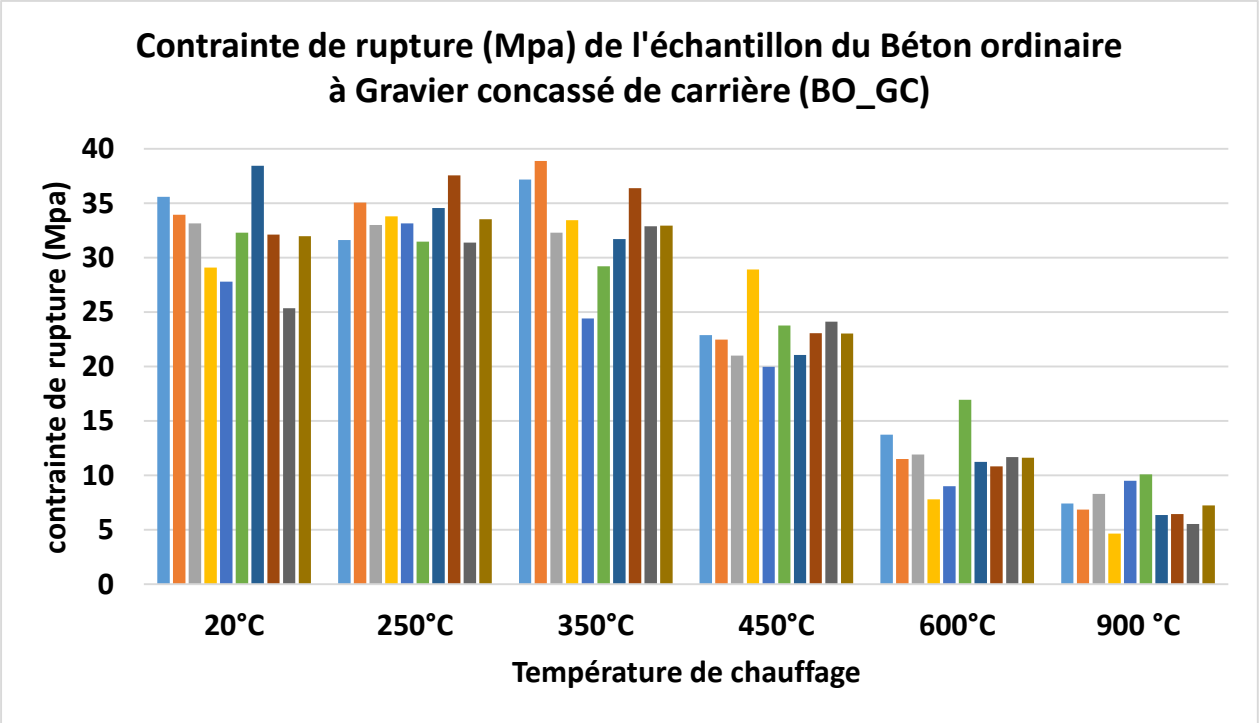


Figure III.8 : Contrainte de rupture (Mpa) de l'échantillon du Béton ordinaire à Gravier concassé de carrière (BO_GC)

La confrontation des résultats obtenus avec les résultats similaires calculables par l'approche de l'Euro code (EC2) montre une corrélation des résultats expérimentaux obtenus (Figure III.9).

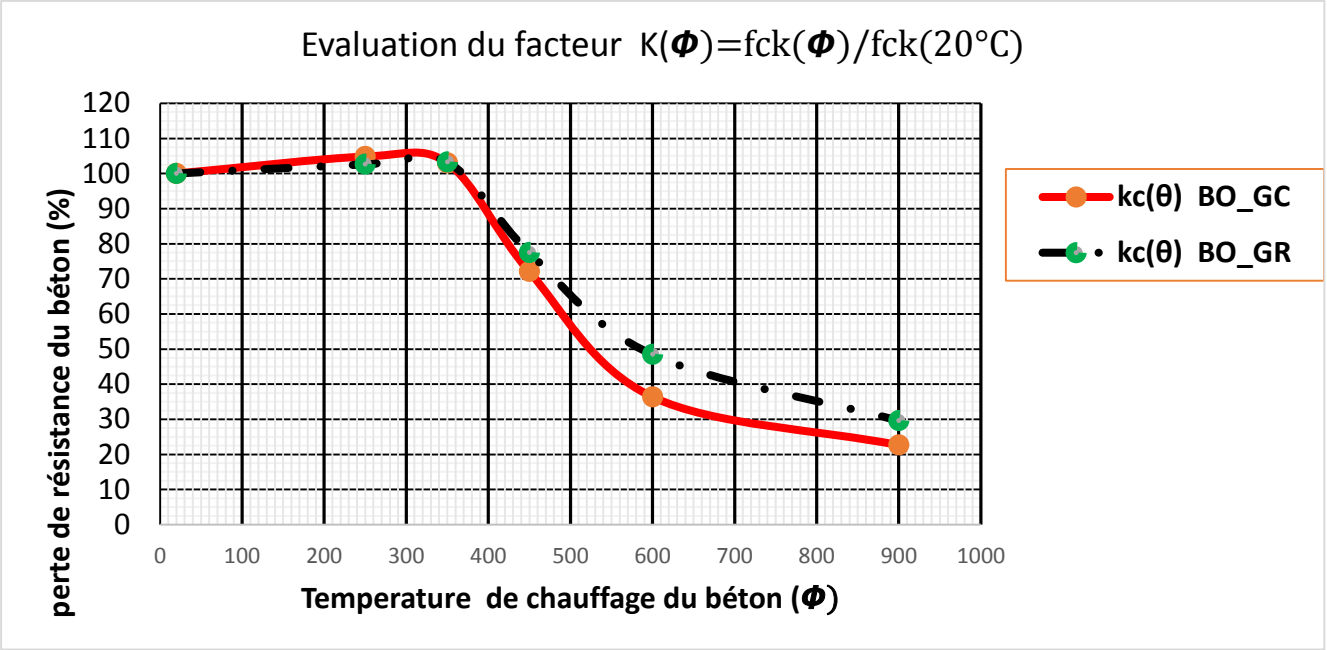


Figure III.9 : Evaluation de la perte de résistance par type de gravier pour les structures en béton armé en cas de d'incendie.

A la lecture de ce graphique, nous pouvons faire quelques observations :

- Les valeurs de la résistance en compression varient en fonction de la température de chauffage : Pour toutes les deux catégories de béton des matériaux locaux étudiés, On remarque qu'à partir de 350°C la résistance du béton diminue par rapport à la température ambiante pour les deux bétons. Cette perte de résistance est attribuée en général aux endommagements (fissuration interne) causés par : la déshydratation, la pression de vapeur et la destruction des produits d'hydratation surtout au niveau des interfaces granulats / pâte de ciment. Cette observation prouve que nos matériaux locaux donnent des résultants convergeant avec la théorie des autres chercheurs déjà cités dans le premier chapitre du revue de la littérature(paragraphe I.5).
- Les valeurs de la résistance en compression varient aussi en fonction du type de granulats utilisés : l'utilisation du gravier de rivière (BO_GR) dans le béton permet d'obtenir une petite perte de résistance à la compression à des températures de chauffage allant jusqu'à 900°C par rapport à l'utilisation des graviers concassés des carrières(BO_GC). Cela est attribué à la faible résistance à la compression des granulats concassés.

III.5. Evaluation de la perte de résistance structurelle des ouvrages

III.5.1. Résistance à la compression

Dans toutes les méthodes de conception et de calcul des structures en situation d'incendie selon la norme euro code les calculs se base sur le facteur kc (θ) [6] déterminé comme suit :

$f_{ck}(\theta) = k_c(\theta)\, f_{ck}(20\ °C)$

$K_c(\theta) = f_{ck}(\theta) / f_{ck}(20\ °C)$

(2) En l'absence d'informations plus précises, les valeurs ci-après du facteur kc (θ), applicables aux bétons de granulats siliceux, peuvent être utilisées.

On peut considérer que ces valeurs sont conservatoires pour les autres types de béton.

$k_c(\theta) = 1{,}0$ pour $20\ °C \leq \theta \leq 100\ °C$

$k_c(\theta) = (1\,600 - \theta)/1\,500$ pour $100\ °C \leq \theta \leq 400\ °C$

$k_c(\theta) = (900 - \theta)/625$ pour $400\ °C \leq \theta \leq 900\ °C$

$k_c(\theta) = 0$ pour $900\ °C \leq \theta \leq 1\,200\ °C$

Pour évaluer l'impact des matériaux locaux sur la portance structurelle des bâtiments post-incendie notre analyse des résultats portera sur le facteur kc(θ)

La figure III.10 montre le pourcentage moyenne de réduction de la résistance en cas d'incendie du bâtiment en Béton Ordinaire des Matériaux Locaux (BO_ML) par rapport au facteur kc(θ) proposé par la norme.

Tableau III-11 : Estimation moyenne de la perte de résistance des structures en matériaux locaux par rapport à la prévision de la norme euro code

T◦c	BO_GC	BO_GR	Valeur moyenne (BO_ML)	BO_ Eurocode
20	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%
250	104.8%	102.6%	103.7%	90.0%
350	103.0%	103.3%	103.1%	83.3%
450	72.0%	77.5%	74.7%	72.0%
600	36.4%	48.4%	42.4%	48.0%
900	22.6%	29.6%	26.1%	0.0%

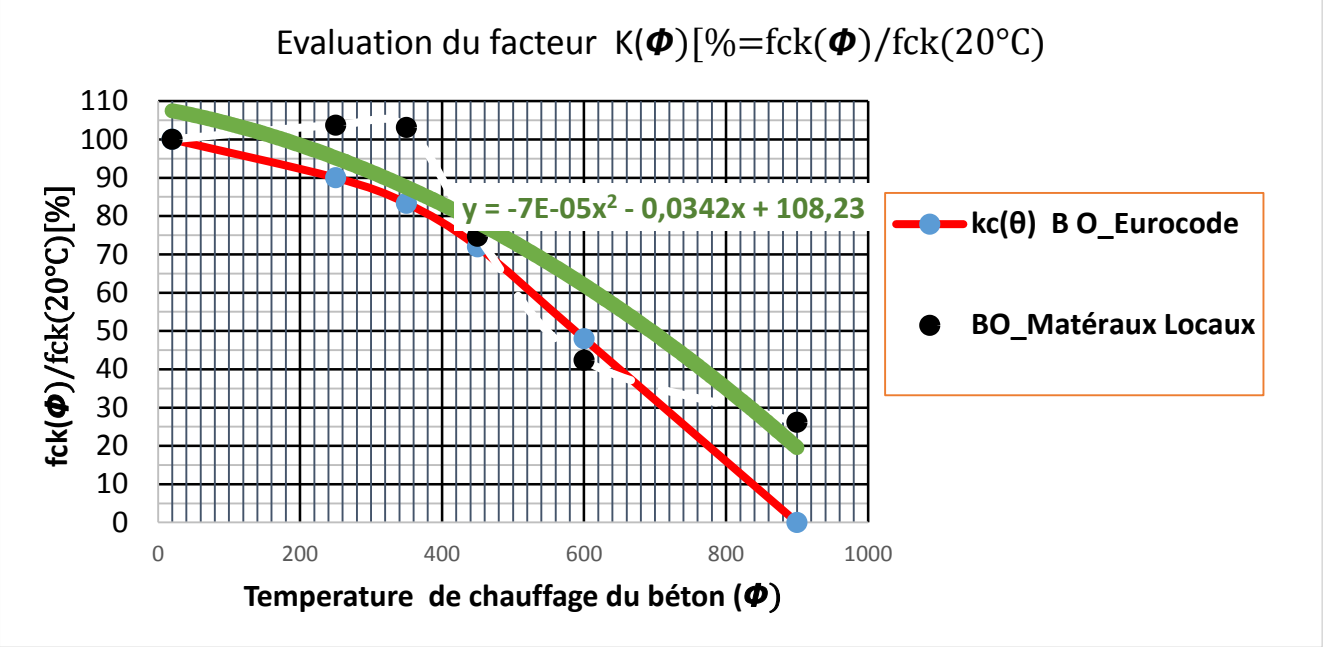


Figure III.10 : Facteur kc(θ) applicable pour la diminution de la résistance à la compression du béton fck aux températures élevées

Au vue de cette figure nous remarquons que nos matériaux locaux suivent l'allure normale de la réduction de la résistance caractéristique à la compression du béton définie par l'Euro code 2-annexe 1-2 [**6**].Néanmoins la résistance à la compression du béton peut être réduite en fonction des températures de chauffage dans l'ordre qui différent de celui de l'Euro code mais d'une façon favorable sur l'ouvrage (Tableau III.12)

Tableau III-12 : Facteur de réduction de la résistance en fonction de la température de chauffage

Température de chauffage	450°C	600°C	900°C
Facteur de réduction de la résistance en cas des matériaux locaux	74.75%	42.40%	26.12%
Facteur de réduction selon la norme Eurocode2	72.00%	48.00%	0.00%
Ecart	2.75%	-5.60%	26.12%
Moyenne		7.76%	

La figure III.10 présente la variation du facteur de réduction des deux bétons (Béton ordinaire de l'Euro code (BO_ Euro code) et béton ordinaire des matériaux locaux (BO_ML)), après les cycles de chauffage dont les paliers de température sont fixés à 250°C, 350°C, 450°C, 600°C et 900°C.

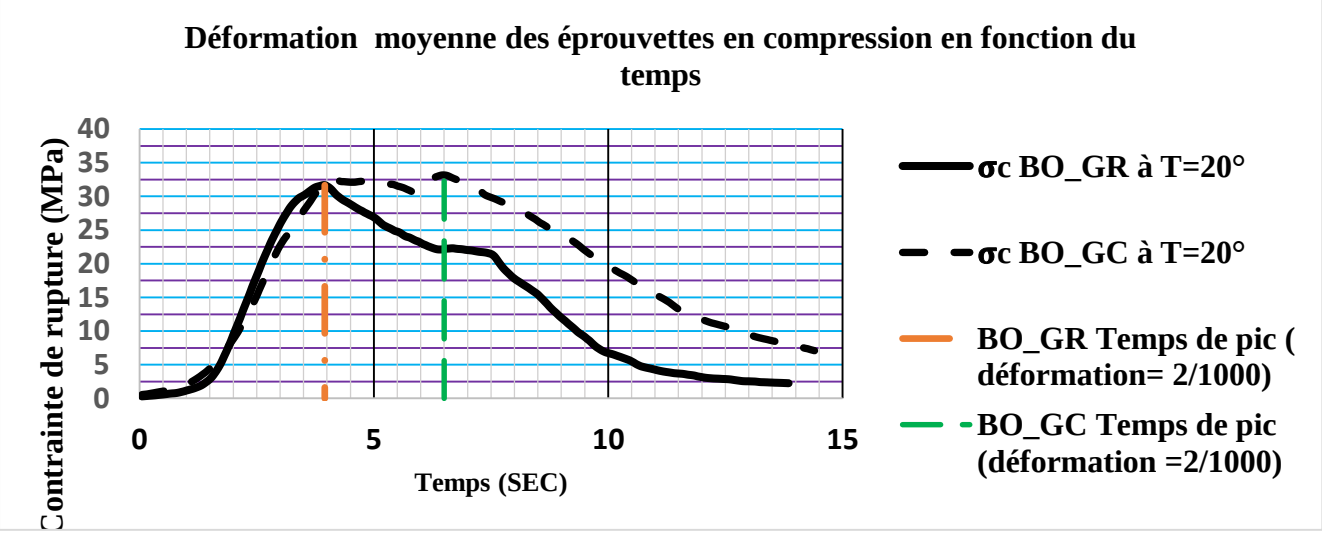
On constate sur la figure III.5 que les matériaux locaux présentent une allure générale des courbes du facteur de réduction des résistances recommandée par la norme

Pour les matériaux locaux, la variation du facteur de réduction est légèrement supérieur à celle de l'Euro code avec un écart moyenne de 7.76%. Cette augmentation correspond à une augmentation de la résistance de nos matériaux locaux (les granulats). Une différence de 26.12% du facteur de réduction de la résistance est enregistrée après le chauffage maximale de 900°C tandis que pour les autres températures la différence enregistre n'est que 2.75% à 450°C et 5.6% à 600°C.

III.5.2. Module d'élasticité

Les déformations élastiques du béton dépendent largement de la composition de celui-ci (notamment des granulats) [2].. Il convient cependant de les déterminer de manière explicite si la structure est considérée comme sensible aux écarts éventuels par rapport aux valeurs générales de la norme.

Sur base de la théorie exposée au paragraphe I.2 de la revue de la littérature, les résultats de l'étude expérimentale sont montrés sur les figures (III.11 à III.15)



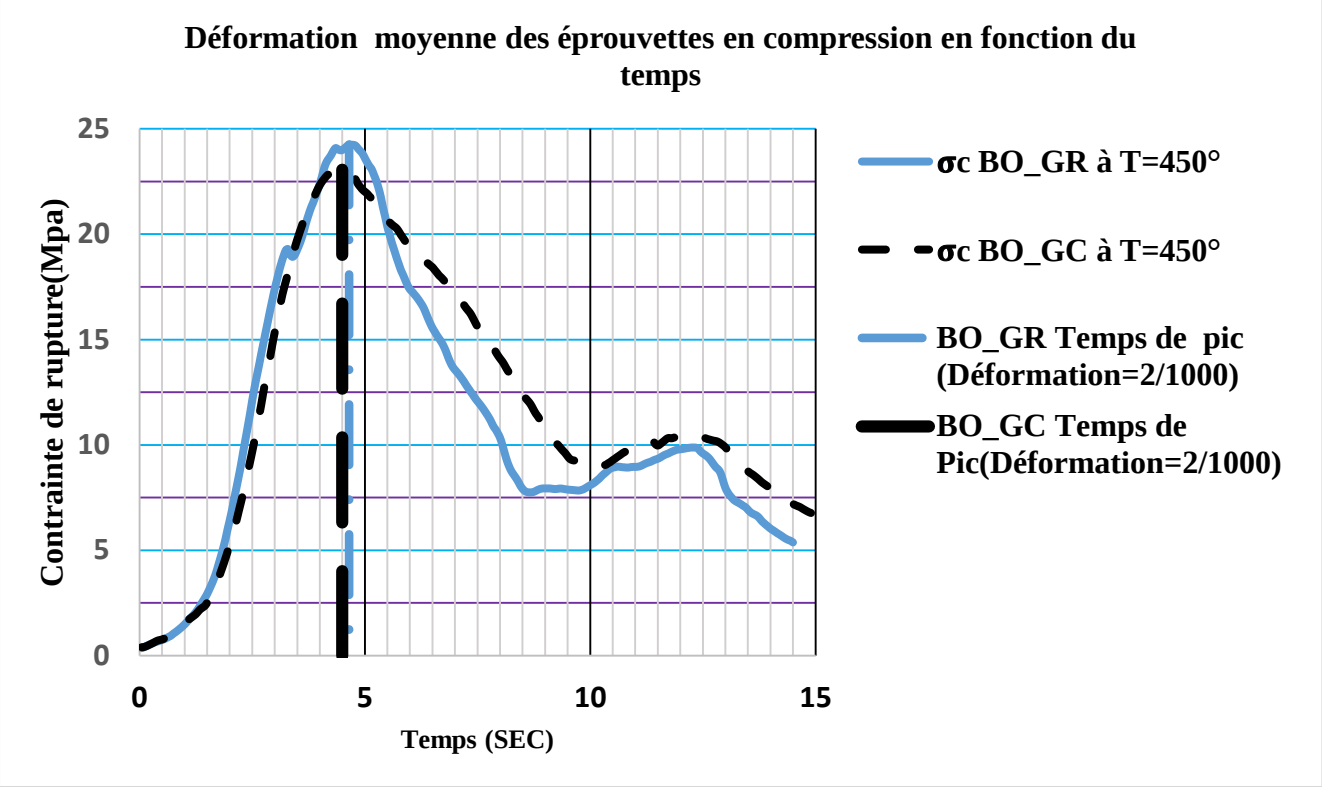
Type de béton	Temps du pic (sec)	Contrainte de rupture (Mpa)	Module d'élasticité(Gpa)
BO_GR	3.95	31.60	31.07
BO_GC	6.50	32.30	31.27
Ecart	-2.55	-0.70	-0.2

Figure III.11 : Déformation moyenne des bétons BO_GR et BO_GC à la température ambiante

A partir d'une courbe contrainte déformation d'un essai de compression (Figure III.11), on peut tirer les grandeurs suivantes :

- le module de Young instantané $E_{ij} \approx 30\ 000$MPa,
- la contrainte maximale max ≈ 30 MPa,
- la déformation maximale à la rupture ≈2 ‰

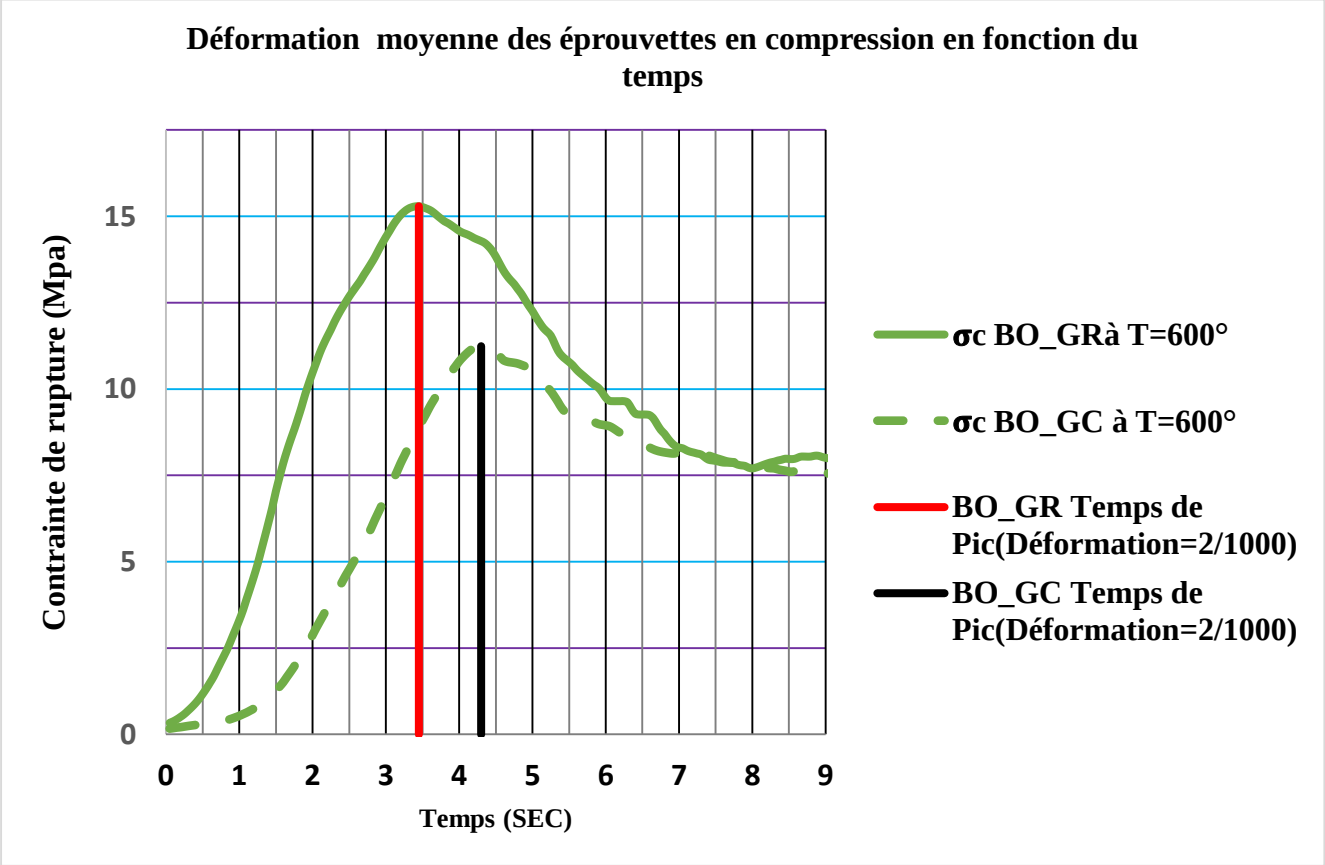
Ainsi donc, à température ambiante, la résistance et le module d'élasticité ne varient pratiquement pas avec la nature du gravier; pour les bétons Ordinaires de gravier de rivière (BO_GR), on observe sur la figure III.7 une rupture précoce par rapport au Béton ordinaire de Gravier de carrière concassé (BO_GC) avec un écart d'environ 2.55 sec.



Type de béton	Temps du pic (sec)	Contrainte de rupture (Mpa)	Module d'élasticité(Gpa)
BO_GR	4.65	24.25	28.70
BO_GC	4.50	23.06	28.27
Ecart	0.15	1.19	0.43

Figure III.12 : Déformation moyenne des bétons BO_GR et BO_GC à 450°C de chauffage

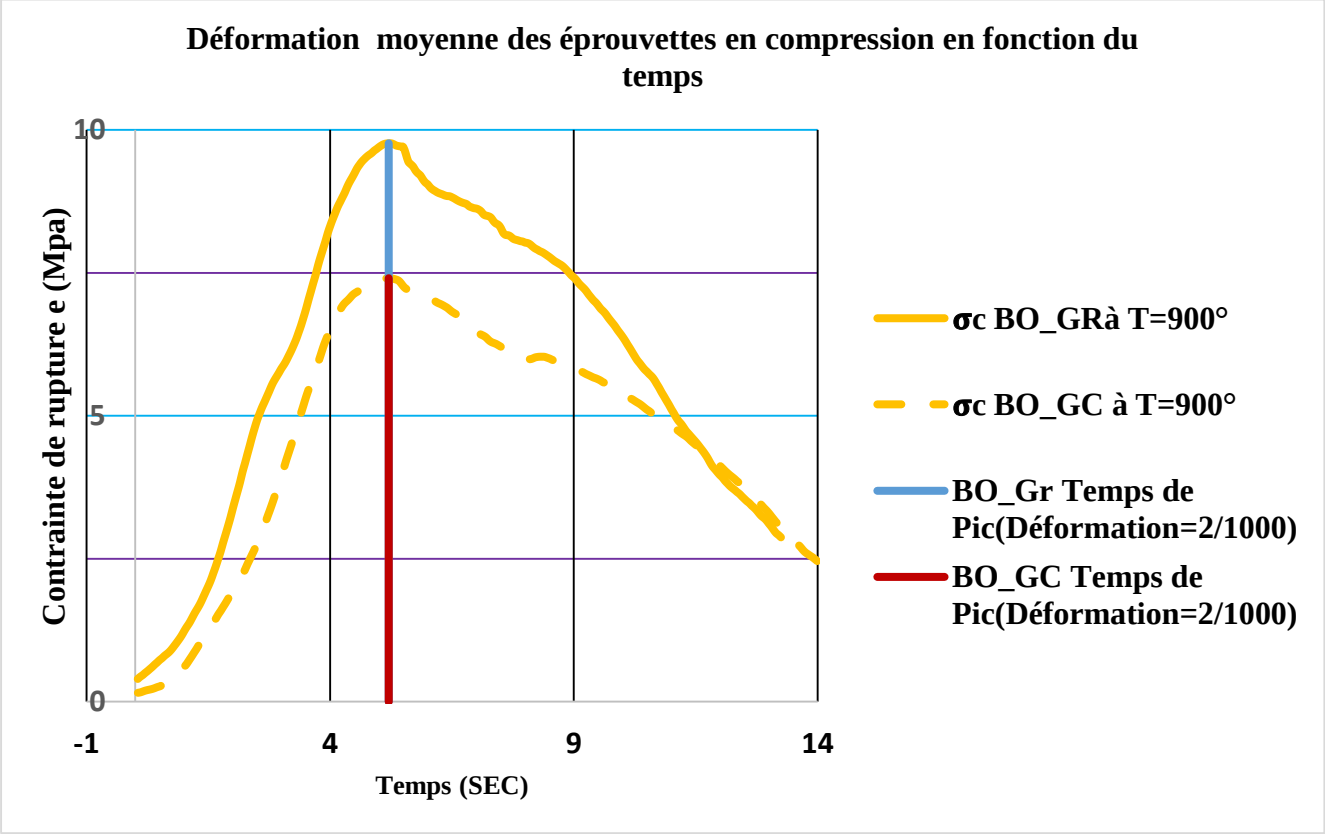
A 450°C de chauffage, la résistance et le module d'élitiste tendent à un écart significatif (1.19Mpa et 431 Mpa) par contre on observe sur la figure III.12 que le temps de rupture tend à se rapproche (Ecart de 0.15sec).



Type de béton	Temps du pic (sec)	Contrainte de rupture (Mpa)	Module d'élasticité(Mpa)
BO_GR	3.45	15.25	24.97
BO_GC	4.50	11.51	22.95
Ecart	-1.05	3.74	2.02

Figure III.13 : Déformation moyenne des bétons BO_GR et BO_GC à 600°C de chauffage

A 600°C de chauffage, la résistance et le module d'élitiste tendent respectivement à un écart significatif (3.74 Mpa et 2.02 Gpa) par contre on observe que béton BO_GR s'écrasé plus rapidement que le béton BO_GC (Ecart de 1.05 sec).



Type de béton	Temps du pic (sec)	Contrainte de rupture (Mpa)	Module d'élasticité(Gpa)
BO_GR	5.20	9.77	21.85
BO_GC	5.20	7.41	20.11
Ecart	0.00	2.36	1.74

Figure III.14 : Déformation moyenne des bétons BO_GR et BO_GC à 900°C de chauffage

A 900°C de chauffage, la résistance et le module d'élasticité tendent respectivement à un écart significatif (2.36Mpa et 1.74 Gpa) par contre on observe sur la figure III.14 que le temps de rupture du Béton ordinaire de Gravier de carrière concassé (BO_GC) coïncide avec celui de rupture du béton BO_GR avec un faible résistance de 10Mpa).

La figure III.15 montre la vue globale de la variation des propriétés du béton sous l'influence de la température de chauffage

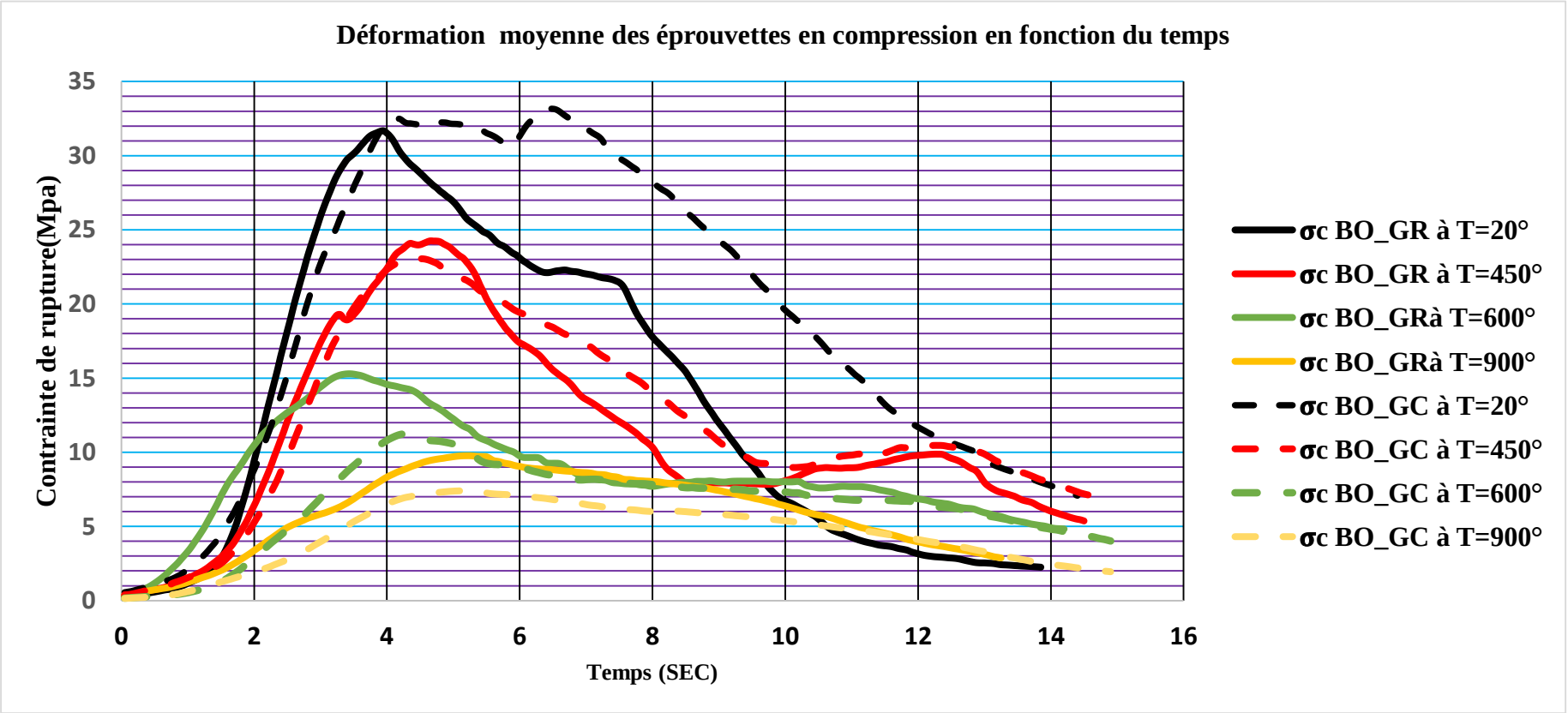


Figure III.15: Vue globale de la variation des propriétés mécanique des bétons sous l'influence de la température de chauffage

L'évolution du module d'élasticité est similaire pour les deux bétons BO_GR et BO_GC. A 900°C les bétons conservent une petite résistance (inférieur à 10 Mpa soit moins de 30% de leur résistance à la température ambiante)

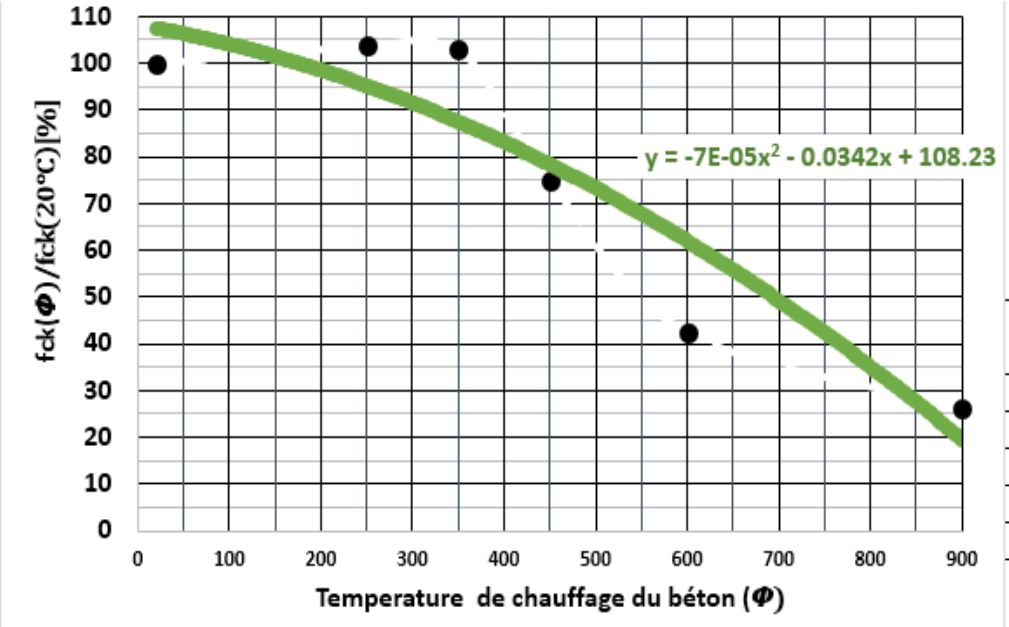
III.5.3. Perte éventuelle de résistance dans les zones comprimés de la structure poste incendie

Dans un ouvrage en béton armé, les poteaux et les poutres sont des éléments les plus victime de la perte de résistance à la compression du béton.



Figure III.16: Illustration des éléments porteurs d'une structure à risque de perte de résistance en cas d'incendie

La perte de résistance dans les zones comprimées des structures en béton chauffés à 250°C, 350°C ,450°C, 600°C et 900°C sont estimé respectivement à 5%,15%, 22%, 40% et 88%



T° de chauffage	Perte de Résitance
250°C	5%
350°C	15%
450°C	22%
600°C	40%
900°C	88%

Figure III.17: Pourcentage rapportés à la Perte éventuelle de résistance dans les zones comprimées des poteaux et poutres en béton armé

Dans cet étude nous avons déjà montre que jusqu'à 250°C de chauffage, aucunes perte de résistance ou dégradations macroscopiques n'est observé sur le béton. Par contre à partir de 350°C, des changements de couleur sur la structure apparaissent par rapport à l'état initial de l'ouvrage.

Une augmentation de l'ouverture des fissures accompagnée d'une chute de résistance est très significative au-delà de 400 °C. Ceci peut être expliqué par une modification de la structure du béton due à la différence du coefficient de dilatation thermique de la pâte de ciment et des granulats, l'augmentation de la porosité, l'apparition de micro et macro fissures et la décomposition du granulat à des températures supérieure à 550 °C [23]. Cette augmentation s'intensifie avec l'augmentation de la température (Tableau III.13).

Tableau III-13: Perte de résistance dans les zones comprimées des structures en béton armé (%)

T° de chauffage	**250°C**	**350°C**	**450°C**	**600°C**	**900°C**
Perte éventuelle de Résistance dans les zones comprimés des poteaux et poutres	**5%**	**15%**	**22%**	**40%**	**88%**

CONCLUSION GENERALE ET RECOMMANDATIONS

Conclusion générale

Le travail effectué dans cette étude avait comme objectif principal de montrer l'impact des matériaux locaux sur la portance des structures après incendie pour pouvoir évaluer la perte de résistance des bâtiments locaux en béton armé post- incendie. Les résultats obtenus nous ont permis de conclure les points suivants :

L'étude bibliographique a permis d'avoir une vision sur les principaux phénomènes physiques et chimiques intervenant dans le béton lors d'exposition à haute température. La dégradation des propriétés physiques et mécaniques du béton est étroitement associée à la déshydratation de la pâte de ciment et les transformations cristallines et la décarbonatation des granulats ce qui justifie les objectifs de cette étude.

L'analyse du comportement des granulats à haute température a été réalisée sur deux granulats : un seul sable de rivière, un gravier de rivière et gravier concassé des carrières. Ces granulats ont été soumis à l'analyse granulométrique pour connaitre la vraie granulométrie de nos matériaux locaux. Les résultats ont montré que tous ces trois granulats ont une granulométrie continue favorable à la fabrication du béton.

Deux formulations de béton à base des différents graviers étudiés précédemment ont été fabriquées afin de couvrir la gamme des bétons ordinaires à graviers de carrières et bétons ordinaire à base des graviers concassés de carrière. Après l'analyse de la formulation du béton suivant la méthode de DREUX-GORISSE, Ces deux bétons ont été confectionnés en gardant le squelette granulaire constant (35 % du sable te 65% du gravier). Les propriétés physiques telles que la résistance en compression et le module d'élasticité ont été étudié. Ces propriétés ont été établies à l'état de référence à température ambiante (≈20°C) et comparées avec celles déterminées après le chauffage aux températures de 250°C, 350°C,400°C , 600°C et 900°C. Une comparaison a été, par la suite, établie entre les bétons de différents graviers.

Parallèlement à ces essais macrostructuraux, d'autres essais d'observation à différentes échelles ont été mené. Après analyse des couches blanchâtre qui apparaissent à partir de 450°C, nous avons remarqué que nos matériaux locaux sont susceptibles de subir la réaction de décarbonatation.

Après les cycles de chauffage à 450°C, 600°C et 900°C, nous avons observé que l'épaisseur de la couche décarbonatée augmente avec l'augmentation de la température.

Des observations microscopiques avec un Microscope Electronique n'ont pas été effectuées par manque d'équipement de notre laboratoire.

La comparaison des courbes des facteurs de réduction de la résistance à la compression obtenue et celle de l'Euro code montre que :

- nos matériaux locaux suivent l'allure normale de la réduction de la résistance caractéristique à la compression du béton définie par l'Euro code 2-annexe 1-2 [6].
- la résistance à la compression du béton est réduite en fonction des températures de chauffage dans l'ordre qui différent de celui de l'Euro code mais d'une façon favorable sur l'ouvrage

Les valeurs de la résistance en compression varient en fonction de la température de chauffage :

- une petite augmentation de la température est observée pour toutes les deux catégories de béton des matériaux locaux étudiés jusqu'à la température de chauffage de 350°C tandis qu'au-delà de cette température, tous les bétons présentent une baisse significative de la résistance en compression. Cette observation prouve que nos matériaux locaux donnent des résultants convergeant avec la théorie des autres chercheurs déjà cités dans le premier chapitre du revue de la littérature.
- Les valeurs de la résistance en compression varient aussi en fonction du type de granulats utilisés : l'utilisation du gravier de rivière (BO_GR) dans le béton permet d'obtenir une petite perte de résistance à la compression à des températures de chauffage allant jusqu'à 900°C par rapport à l'utilisation des graviers concassés des carrières(BO_GC).
- La perte de résistance dans les zones comprimés des structures en béton chauffés à 250°C, 350°C ,450°C, 600°C et 900°C sont estimé respectivement à 5%,15%, 22%, 40% et 88% .

Les résultats démontrent que l'évolution du module d'élasticité est similaire pour les deux bétons BO_GR et BO_GC.

Recommandations

Cette étude ne peut être achevée sans émettre quelques suggestions et recommandations aux différentes personnes physiques ou morales ayant un intérêt direct ou indirect à ce sujet :

1. Au Maitre de l'Ouvrage
    - De prévoir des moyens d'entretien dès le début de l'utilisation de l'ouvrages pour assurer sa durabilité ;
    - De commanditer une étude d'évaluation de la portance structurelle des bâtiments post-incendie avant d'envisager la réhabilitation ou la réutilisation des ouvrages en béton armé post-incendie
2. Au Maitre d'Œuvres, dans l'étude, nous lui recommandons de prévoir :

- des allées de circulation devant permettre aux camions anti-incendie d'intervenir rapidement en cas d'incendie pour les gros ouvrages ;
- des bouches d'incendie dans la zone visible et accessible, pour qu'on puise de l'eau afin de remplir rapidement les camions, en cas d'accident ;
- des extincteurs dans les différents coins des ouvrages conçus

3. Aux futurs Chercheurs : De continuer les recherches sur les matériaux locaux parce que domaine est presque vierge au Burundi
4. A l'université du Burundi : d'équiper les laboratoires afin de rendre facile les travaux de recherche
5. Au gouvernement du Burundi :
    - D'encourager et soutenir les travaux de recherches en préconisant du budget pour les meilleurs projets proposés par les chercheurs.
    - D'équiper le laboratoire national ;
    - De créer des centres de recherches

Bibliographie

[1] Y. Sieffert, Le béton armé selon les Eurocode 2"cours et exercices", Belgique, 2010.

[2] «Eurocode 2: Calcul des structures en béton - Partie 1-1 : Règles p.g 34».

[3] Denoël., Sécurité incendie et constructions en béton, Bruxelle: Fédération de l'industrie cimentière belge,, 2007.

[4] A. S. D. X. F. P. F. R.-M. L. C. N. B. O. G. Divet L., Présentation des techniques de diagnostic de l'état d'un béton soumis à un incendie, Laboratoires Centrale des Ponts et Chaussées LCPC, 2005.

[5] S. Elias, «POUR PREVENIR LES INCENDIES DES MARCHES AU BURUNDI, UNE MEILLEURE GOUVERNANCE,» n° %115, 2018.

[6] T. J. S. F. Harada T, Strength, elasticity and thermal properties of concrete subjected to elevated temperatures ». Concrete for nuclear reactors, Detroit: Americain Concrete Institue, pp 179-203. SP-39., 1973.

[7] B. Z. Kaplan M, Concrete at high temperatures : material properties and mathematical models, Longman: Concrete Design and Construction Series, 1996.

[8] «EuroCode 2, partie 1-2».

[9] S. C. A. O. Samia HACHEMI, «Effet de la température sur les propriétés mécaniques du béton ordinaire et de,» p. 8, 2017.

[10] A. M. S., Compressive strength of concrete at temperatures to 1600°F, Michigan: American Concrete Institute (ACI) SP 25, 1971.

[11] J.-C. Mindeguia, Contribution expérimentale à la compréhension des, Université de Pau et des Pays de l'Adour, 2009.

[12] P. e. CARINO, Code Provisions for High Strength Concrete Strength-Temperature Relationship at Elevated Temperatures, Materials and Structures, Vol. 36, pp. 91-98, 2003.

[13] Hager, Comportement à haute température des bétons à haute performance – Evolution des principales propriétés mécaniques, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées et l'Ecole Polytechnique de Cracovie,, 2004.

[14] Kanema, Influence des paramètres de formulation sur le comportement à haute température des bétons, Université de Cersy-Pontoise, 2007.

[15] P. M. R. G. R. S. Gallé C., Effect of the heating rate on residual thermo-hydro-mechanical properties of a high-strength concrete in the context of nuclear waste storage, Prague: SMiRT 17), 2003.

[16] Touidjine, «Le béton sous haute température,» http://www.batiactu.com/edito, 2011.

[17] G. A. Khoury, «Spalling review: Types, Assessment and Prevention,» *UPTUN UPgrading of exisiting TUNnels.*, 2005.

[18] G. DREUX, Nouveau Guide du béton et de ses constituants, Paris: ENS Paris-Saclay, 2018.

[19] H. R., Contribution à l'étude des bétons portés en température : Evolution des propriétés de transfert / Etude de l'éclatement, Thèse de Doctorat, Lyon: Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2011.

[20] B. Moulaï, «ETUDE COMPARATIVE DU BETON HAUTE PERFORMANCE ET UN BETON ORDINAIRE SOUMISES À UN CHARGEMENT THERMOMECANIQUES,» n° %1Actes des 6ème Journées de Mécanique de l'Ecole Militaire Polytechnique.

[21] X. Z, Influence de la nature minéralogique des granulats sur leur comportement et celui du béton à haute température, Thèse de Doctorat, Université de Cergy-Pontoise, 2011.

[22] B. A.-L. H. R. N. A. L. B. X. Z. B. R. Niry R., Influence de la composition chimique et minéralogique des granulats sur leurs comportement à température élevée, Colloque « Performances du béton soumis à haute température », 2012.

[23] I. G. Hager, Comportement à haute température des bétons à haute performance-évolution des principales propriétés mécanique,Thèse de Doctorat, 2004, Ecole Nationale des Ponts et chaussées et l'Ecole Polytechnique de Cracovie,.

[24] H. Samya, Etude du Comportement du béton soumis à haute température : Influence du type de béton et de la nature des constituants, Université Mohamed Khider – Biskra, 2015.

[25] B. M. Abdellah, Comportement du béton sous l'effet d'une élévation de la température, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran, 2006.

[26] J.-M. FRANSSEN, Contributions à la modélisation des incendies, pge 326: UNIVERSITE DE LIEGE, 1997.

[27] E. SENTAMBA, «Pour prevenir les marchés aux Burundi,une meilleure gouvernance,» *ResearchGate.Net,* p. 13, 2018.

[28] Eurocode, «Calcul des structures en béton - Partie 1-2 : Règles générales - Calcul du comportement au Feu,» 2005.

[29] Barrett, «On the French and other method of constructing iron floors,» *Civil Engineer and Architect's Journal* , p. 17, 1854.

[30] N. T. e. H. H. a. Zine El abidine Rahmouni, Influence de la nature des granulats sur le comportement rhéologique du béton à hautes températures, http://www.matec-conferences.org or http://dx.doi.org/10.1051/matecconf/20141101010, 2014.

[31] C. N. J. Phan L. T., Code Provisions for High Strength Concrete Strength-Temperature Relationship at Elevated Temperatures, Materials and Structures, 2003.

[32] Kanema T. M., Influence des paramètres de formulation sur le comportement à haute température des bétons, Université de Cersy-Pontoise: Thèse de Doctorat, 2007.

[33] «Euurocode 2,» chez *Conception et calcul des structures en situation d'incendie,P.g24*.