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

Contribution du béton dans la défaillance structurale des bâtiments en béton arme au Burundi

Ndikumana, Justin

2021-09
UB, FSI
https://repository.ub.edu.bi/handle/123456789/271

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

UNIVERSITE DU BURUNDI

FACULTE DES SCIENCES DE L'INGENIEUR

Département de Génie civil

CONTRIBUTION DU BETON DANS LA DEFAILLANCE STRUCTURALE DES BATIMENTS EN BETON ARME AU BURUNDI.

Justin NDIKUMANA

Mémoire

Présenté en vue d'obtenir :

Le diplôme de Master en Sciences de l'Ingénieur

Option : Génie civil, Aménagement et Maitrise des projets

Sous la direction de : Dr-Ir. MIKEREGO Emmanuel (Directeur)

Bujumbura, Septembre 2021

Identification des membres du Jury :

Dr-Ir. MIKEREGO Emmanuel (Directeur)

Dr-Ir. NIBASUMBA Paul (Président)

Dr-Ir. HATUNGIMANA Daniel (Secrétaire)

Dr-Ir. MASEKANYA Jean Pierre (Membre)

DEDICACE

A chers parents ;

A nos chers sœurs et frères ;

A tous nos amis qui nous sont chers ;

Nous leur dédions ce mémoire.

REMERCIEMENTS

Nous rendons grâce à Dieu qui nous a guidé dès le début jusqu'à l'accomplissement du présent travail de fin d'étude de Master. En effet, nous tenons à exprimer nos vifs remerciements à toute personne qui a contribué à sa réalisation.

D'abord, nous remercions sincèrement nos chers parents qui nous ont élevé et mis au bas de l'école afin d'avoir une bonne éducation. Ensuite, nous tenons à remercier tous nos éducateurs depuis ceux de l'école primaire jusqu'à ceux de l'Université du Burundi, plus particulièrement les enseignants du cycle de master en Génie-Civil, Aménagement et Maitrise des Projets.

Et puis, nos remerciements s'adressent à Monsieur Dr-Ir. Emmanuel MIKEREGO, le Directeur de ce mémoire pour ses conseils et encouragements qu'ils nous ont prodigués ainsi qu'à l'Ir Isaac BIGIRIMANA de laboratoire national de LNBTP pour son soutien matériel.

Nos remerciements vont aussi à l'endroit de la famille de Monsieur Innocent RUGEMINTORE pour son soutien moral et financier.

A tout un chacun, nous disons grand merci.

Justin NDIKUMANA

RESUME

Au Burundi, des bâtiments en béton armé se sont écroulés pendant la construction. C'est dans cette optique, que nous avons choisi un sujet de recherche portant sur la « **Contribution du béton dans la défaillance structurale des bâtiments en béton armé au Burundi** » pour identifier si le béton constitue un des causes de ces effondrements.

Dans le présent projet, nous avons pu étudier dix-sept bâtiments de trois niveaux, ce nombre devrait être supérieur à celui-ci mais il a été limité par diverses difficultés telles que non accès d'entrer dans certains chantiers et manque de moyens financiers. Les bâtiments de trois niveaux ont été choisis par le fait que les six (6) cas effondrés en cours de construction sont tous de trois niveaux. L'accent particulier a été porté sur les résistances en compression des éléments structuraux du bâtiment d'étude, à savoir : les poteaux, les poutres et les dalles. Lors de l'étude, les résistances mécaniques ont été mesurées avec le scléromètre à béton dénommé « Schmidt Hammer ».

Les valeurs de résistance en compression mesurées sur les dix-sept bâtiments faisant objet de notre étude se sont révélées non satisfaisantes. En effet, quatre-vingt-trois pourcent (83%) des valeurs mesurées pour les poteaux, quatre-vingt-deux pourcent (82%) des valeurs mesurées pour les poutres et quatre-vingt-trois pourcent (83%) des valeurs mesurées pour les dalles sont inférieures aux valeurs de référence exigées par les normes, qui sont (25MPa) pour les bétons de ciment de la classe (32.5R) et (35MPa) pour les bétons de ciment de la classe (42.5R).

Les résultats trouvés dans cette étude montrent d'une façon globale que quatre-vingt-deux (82 %) des éléments structuraux ont des résistances en compression du béton inferieures aux résistances (normatives) de référence. Au vu des résultats de cette étude, il a été établit que le béton peut être l'une des causes de l'effondrement des bâtiments en béton armé au Burundi.

Les mots clés : Béton, bâtiments, scléromètre à béton, résistance mécanique, effondrement, matériaux, poteaux, poutres, dalles, défaillance structurale.

ABSTRACT

In Burundi, reinforced concrete buildings collapsed during construction. It is with this in mind that we have chosen a research subject on the "**Contribution of concrete in the structural failure of reinforced concrete buildings in Burundi**" to identify whether concrete constitutes one of the causes of these collapses.

In the present project, we were able to study seventeen three-storey buildings, this number should be greater than this one, but it was limited by various difficulties such as no access to certain sites and lack of financial means. The three-level buildings were chosen because the six (6) collapsed cases under construction are all three-level. Particular emphasis was placed on the compressive strengths of the structural elements of the study building, namely: columns, beams and slabs. During the study, the mechanical strengths were measured with a concrete sclerometer "Schmidt Humer"

The compressive strength values measured on the seventeen buildings covered by our study were found to be unsatisfactory. In fact, eighty-three percent (83%) of the measured values for the columns, eighty-two percent (82%) of the measured values for the beams and eighty-three percent (83%) of the measured values for the slabs are lower than the reference values required by the standards, which are (25MPa) for cement concretes of class (32.5R) and (35MPa) for cement concretes of class (42.5R).

The results found in this study show overall that eighty-two (82%) of the structural elements have concrete compressive strengths lower than the reference (normative) strengths. Based on the results of this study, it was established that concrete may be one of the causes of the collapse of reinforced concrete buildings in Burundi.

Key words: Concrete, buildings, concrete sclerometer, mechanical strength, building collapse, materials, columns, beams, slabs, structural failure.

SOMMAIRE

Identification des membres du jury.....i

Dedicace.....ii

Remerciement.....iii

Resumé.....iv

Abstract…….....v

Sommaire.....vi

Liste des tableaux.....ix

Liste des figures.....xi

Les notations.....xiv

Avant-propos xv

0. INTRODUCTION GENERALE 1

0.1. Problématique..... 1

0.2. Objectifs de l'étude..... 2

0. 2.1. Objectif global 2

0.2.2. Objectifs spécifiques..... 2

CHAPITRE 1. REVUE DE LA LITTERATURE 3

1.1. Introduction 3

1.2. Paramètres pouvant conduire à la défaillance structurale du béton..... 3

1.3. Technologie de bétonnage des éléments en béton amé au Burundi 3

1.3.1. Coffrage 3

1.3.2. Fabrication du béton au Burundi..... 5

1.3.3. Coulage du béton dans les coffrages au Burundi..... 5

1.4. Provenance des matériaux et technologie de mise en œuvre du béton au Burundi. 6

1.5. Causes éventuelles d'effondrement des structures 8

1.6. Procédé d'auscultation des structures 10

1.7. Conclusion 10

CHAPITRE 2. METHODOLOGIE DE L'ETUDE EXPERIMENTALE .. 11

2.1 Introduction 11

2.2. Lieux d'étude 11

2.3. Matériels et méthodes utilisés pour bien mener l'étude In-situ 11

2.4. Identification des matériaux locaux au laboratoire 17

2.4.1. Ciment 17

2.4.2. Caractéristiques physiques de sable roulé 17

2.4.3. Masse volumique apparente : norme (EN 18-554) 19

2.4.4. Masse volumique absolue : norme (EN 18-301) 19

2.4.5. L'équivalent de sable : norme (EN 933-8) 20

2.5. Gravier roulé 21

2.5.1. Caractéristiques physiques de gravier 21

2.5.2. Masses volumiques apparentes : norme (NF EN 12620 22

2.5.3. Masses volumiques absolues 23

2.6. Fabrication du béton au laboratoire 23

2.6.1. Formulation du béton 24

2.6.2. Proportion volumique 24

2.6.3 Résultats des essais granulométriques pour la formulation du béton 24

2.6.4 Confection des éprouvettes 26

2.6.5. Essais destructifs (essai de compression sur éprouvettes) 26

2.7. Conclusion 27

CHAPITRE 3. PRESENTATION ET ANALYSE DES RESULTATS 28

3.1. Introduction 28

3.2. Identification des cas d'écroulement des bâtiments au Burundi 28

3.3. Ciments usuels au Burundi 30

3.4. Qualification de la main d'œuvre 30
3.5. Procédure de fabrication du béton 30
3.6. Résistances mécaniques des bétons mesurées au scléromètres 31
3.7.Analyse et discussion des résultats 48
3.8. Comparaison des résultats obtenus par deux méthodes (mesure au Scléromètre et au presse) 60
3.9. Conclusion 64
Conclusion générale et recommandations 65
Références bibliographiques 66
Annexe 68

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1 – Dosage recommandé par le fabricant du Ciment A de classe (32.5)..... 12
Tableau 2.2 – Dosage recommandé par le fabricant du Ciment B de classe (42.5)..... 12
Tableau 2.3 – Dosage recommandé par le fabricant du Ciment C de classe (42.5)..... 12
Tableau 2.4 – Dosage recommandé par le fabricant du Ciment D de classe (42.5)..... 13
Tableau 2.5 – Correction de la valeur de l'indice de rebondissement en fonction de l'angle d 'inclinaison 15
Tableaux 2.6 – Analyse granulométrique du (sable roulé de la Rivière Gasenyi). 17
Tableaux 2.7 – Analyse granulométrique du (sable roulé de la rivière Gikoma). 18
Tableau 2.8 – masse volumique apparente du Sable des Rièvière (Gasenyi et Gikoma) 19
Tableau 2. 9 – Masse volumique absolue du .Sable des Rivières Gasenyi et Gikoma.....19
Tableau 2. 10 – Résultats essais d'équivalent de sable 21
Tableau 2. 11 – Analyse granulométrique du Gravier 21
Tableaux 2.12 – Masse volumique apparente de Gravier 23
Tableaux 2. 13 – Masse volumique absolue de classes des Graviers. 23
Tableaux 2. 14 – Résultats des essais granulométriques du sable. 24
Tableaux 2. 15 – Résultats des essais granulométriques des graviers. 25
Tableau 3.1 – Résultats des valeurs de résistance en compression du béton sur les éléments structuraux du chantier No1. 31
Tableau 3.2 – Résultats des valeurs de résistance en compression du béton sur les éléments structuraux du chantier No2. 32
Tableau 3.3 – Résultats des valeurs de résistance en compression du béton sur les éléments structuraux du chantier No3. 33
Tableau 3.4 – Résultats des valeurs de résistance en compression du béton sur les éléments structuraux du chantier No4. 34
Tableau 3.5 – Résultats des valeurs de résistance en compression du béton sur les éléments structuraux du chantier No5. 35
Tableau 3.6 – Résultats des valeurs de résistance en compression du béton sur les éléments structuraux du chantier No6. 36
Tableau 3.7 – Résultats des valeurs de résistance en compression du béton sur les éléments structuraux du chantier No7. 37

Tableau 3.8 – Résultats des valeurs de résistance en compression du béton sur les éléments structuraux du chantier No8. 38
Tableau 3.9 – Résultats des valeurs de résistance en compression du béton sur les éléments structuraux du chantier No9. 39
Tableau 3.10 – Résultats des valeurs de résistance en compression du béton sur les éléments structuraux du chantier No10. 40
Tableau 3.11 – Résultats des valeurs de résistance en compression du béton sur les éléments structuraux du chantier No11. 41
Tableau 3.12 – Résultats des valeurs de résistance en compression du béton sur les éléments structuraux du chantier No12. 42
Tableau 3.13 – Résultats des valeurs de résistance en compression du béton sur les éléments structuraux du chantier No13. 43
Tableau 3.14 – Résultats des valeurs de résistance en compression du béton sur les éléments structuraux du chantier No14. 44
Tableau 3.15 – Résultats des valeurs de résistance en compression du béton sur les éléments structuraux du chantier No15. 45
Tableau 3.16 – Résultats des valeurs de résistance en compression du béton sur les éléments structuraux du chantier No16. 46
Tableau 3.17 – Résultats des valeurs de résistance en compression du béton sur les éléments structuraux du chantier No17. 47
Tableau 3.18 – Résultats des essais d'écrasement et au scléromètre pour éprouvettes fabriquées au laboratoire. 60

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 – Photo prise 12 mai 2021 illustrant l'exemple de coffrage en bois des chainages au Burundi. 4
Figure 1.2 – Photo prise le 21 juin 2021 illustrant l'exemple de coffrage en bois des planchers en béton armé au Burundi. 4
Figure 1.3 – Photo prise en date du 26 juin 2021 montrant l'étape de malaxage du béton sur l'un des chantiers au Burundi. 5
Figure 1.4 - Photo prise au Burundi en date du 28 juin 2021 montrant un des moments du bétonnage d'un plancher en béton armé. 5
Figure 1. 5 - Photo prise au Burundi en date du 25 juin 2021 montrant un des moments du bétonnage d'un dallage du sol. 6
Figure 1.6 – Photo prise en date du 26 mai 2021 illustrant la rivière Gasenyi comme source des granulats et d'eau utilisés dans la réalisation du béton. 6
Figure 1.7 – Photo prise en date du 26 juin 2021 illustrant la rivière Nyabagere comme source d'eau de gâchage utilisée dans la réalisation du béton. 7
Figure 1.8 – Photo prise en date du 26 juin 2021 au Burundi illustrant l'étape du mélange des constituants d'un futur béton. 7
Figure 1.9 – Photo prise en date du 26 juin 2021 au Burundi illustrant l'étape de gâchage des constituants d'un futur béton. 8
Figure 1.10 – Effondrement d'un immeuble en cours de construction à Toulouse en France. Date de visite 21/05/2021. 9
Figure 1.11 – Effondrement d'un immeuble en cours de construction à Bangladesh. 9
Figure 1.12 – Effondrement d'un immeuble en cours de construction à Kinshasa 26 octobre 2021. 9
Figure 2.1 – Scléromètre utilisé dans l'identification des résistances en compression du béton des colonnes, poutres et dalles des bâtiments concernés par l'étude. 13
Figure 2.2 – Photos d'indication des éléments structuraux qui ont objet d'étude. 14
Figure 2.3 – Essai au scléromètre sur des éléments de déférents angles d'inclinaison 14
Figure 2.4 – Grille de mesure sur ouvrage 15
Figure 2.5 – Photos montrant l'exemple de mesurage de la dureté du béton pour l'ultérieure définition de la résistance en compression du béton. 16

Figure 2.6 – Abaque sur le scléromètre permettant de définir la résistance en compression du béton à partir de la mesure de rebond. 16
Figure 2.7 – Analyse granulométrique du (sable roulé des Rivières Gasenyi et Gikoma). 18
Figure 2.8 – Essais d'équivalent de sable 20
Figure 2.9 – Illustration schématique d'équivalent de sable 20
Figure 2.10 – Analyse granulométrique gravier roulé de la Rivières Gasenyi . 22
Figure 2. 11 – Masses volumiques apparentes des Gravier roulé. 22
Figure 2. 12 – courbes granulométriques (sable et gravier de la rivière gasenyi). 25
Figure 2.13 – Confection des éprouvettes de béton. 26
Figure 2.14 – Essai d'écrasement à la presse 27
Figure 3.1 – Bâtiment effondré à Buterere, le 16 mai 2018, Quartier Miroir, source agence de protection civile 28
Figure 3.2 – Partie effondrée d'un immeuble au cours d'exécution au quartier Winterekwa , zone Kamenge, commune Ntahangwa 29
Figure 3.3 – Un immeuble effondré au cours d'exécution au quartier Kibenga. 29
Figures 3.4 – Ruine des poteaux des immeubles en construction au Burundi 30
Figure 3.6 – Résistances à la compression mesurées sur les éléments structuraux du bâtiment d'étude numéro (2) en Mairie de Bujumbura. 49
Figure 3.7 – Résistances à la compression mesurées sur les éléments structuraux du bâtiment d'étude numéro (3) en province de Bujumbura. 49
Figure 3.8 – Résistances à la compression mesurées sur les éléments structuraux du bâtiment d'étude numéro (4) en Mairie de Bujumbura. 50
Figure 3.9 – Résistances à la compression mesurées sur les éléments structuraux du bâtiment d'étude numéro (5) à Gitega. 50
Figure 3.10 – Résistances à la compression mesurées sur les éléments structuraux du bâtiment d'étude numéro (6) en Mairie de Bujumbura. 51
Figure 3.11 – Résistances à la compression mesurées sur les éléments structuraux du bâtiment d'étude numéro (7) dans la province de Bujumbura. 51
Figure 3.12 – Résistances à la compression mesurées sur les éléments structuraux du bâtiment d'étude numéro (8) en Mairie de Bujumbura. 52
Figure 3.13 – Résistances à la compression mesurées sur les éléments structuraux du bâtiment d'étude numéro (9) en Mairie de Bujumbura. 52
Figure 3.14 – Résistances à la compression mesurées sur les éléments structuraux du bâtiment d'étude numéro (10) en Mairie de Bujumbura. 53

Figure 3.15 – Résistances à la compression mesurées sur les éléments structuraux du bâtiment d'étude numéro (11) en Mairie de Bujumbura. 53
Figure 3.16 – Résistances à la compression mesurées sur les éléments structuraux du bâtiment d'étude numéro (12) dans la province de Bujumbura. 54
Figure 3.17 – Résistances à la compression mesurées sur les éléments structuraux du bâtiment d'étude numéro (13) dans la province de Gitega. 54
Figure 3.18 – Résistances à la compression mesurées sur les éléments structuraux du bâtiment d'étude numéro (14) dans la province de Bujumbura. 55
Figure 3.19 – Résistances à la compression mesurées sur les éléments structuraux du bâtiment d'étude numéro (15) en Mairie de Bujumbura. 55
Figure 3.20 – Résistances à la compression mesurées sur les éléments structuraux du bâtiment d'étude numéro (16) dans la province de Gitega. 56
Figure 3.22 – Diagrammes des résultats globaux des résistances en compression du béton des poteaux testés et selon la classe de ciment utilisé pour la fabrication des bétons. 57
Figure 3.23 – Diagrammes des résultats globaux des résistances en compression du béton des poutres testées et selon la classe de ciment utilisé pour la fabrication des bétons. 57
Figure 3.24 – Diagrammes des résultats globaux des résistances en compression du béton des panneaux de dalles testés et selon la classe de ciment utilisé pour la fabrication des bétons. . 58
Figure 4.25 – Diagramme-synthèse des valeurs moyennes des résistances en compression du béton des éléments structuraux des 17 bâtiments ayants fait objets d'études. 59
Figure 3.26 – Résistances des bétons à 14 jours 61
Figure 3.27 – Résistances des bétons à 28 jours 61
Figure 3.28 – Résistances des bétons à 14 jours 62
Figure 3.29 – Résistances des bétons à 28 jours 62
Figures 3.30 – $R_{Cpresse}$ 14J en fonction de la résistance mesurée au Scléromètre 63
Figures 3.31 – $R_{Cpresse}$ 28J en fonction de la résistance mesurée au Scléromètre 63

LES NOTATIONS

CND : Contrôle Non Destructifs

CPJ : Ciment Portland composé

E_i : Elément structurel

f_c : Résistance à la compression du béton

f_c^* : Résistance à la compression de référence

LMC : Laboratoire des Matériaux de Construction

LNBTP :Laboratoire national de Bâtiment et des travaux Publics

MPa : Unité de résistance mécanique du béton

N : désigne l'évolution moyenne de la résistance à court terme

NF-EN-12504-2 :Norme Française - European Concrete Standards-12504-2

R_m : Rebond moyen

Rscl : Indice sclérométrique ou rebondissement au scléromètre

32.5 R : indique la classe de ciment de résistance mécanique 32.5

42.5 R et 42.5N : indiquent la classe de ciment de résistance mécanique 42.5

R : désigne l'évolution rapide de la résistance à court terme

SCHMIDT 2000 : Scléromètre à béton édition 2000

AVANT-PROPOS

La défaillance structurale est l'une des grands défis dans certains secteurs de construction du génie civil notamment dans le secteur du bâtiment en béton armé au Burundi qu'à travers le monde.

Le respect des normes de construction s'inscrit dans les ouvrages comme le nouveau guide du béton et de ses constituant. L impacte massive sur la gestion de ces défaillances structurelles et cela s'observe avec les défaillances structurales intenses qui deviennent un phénomène causant l'écroulement des bâtiments en béton armé, ce qui engendrent des pertes majeures humaines, matérielles et économiques énormes.

Les bâtiments en béton armé des individuels sont aujourd'hui menacés par les défaillances structurales causées par la mauvaise qualité du béton. Cette manque de qualité du béton provient de fois aux procédés suivis pour fabriquer des bétons et qui ne suivent pas les normes du béton. Les propriétaires des projets de construction ne confient pas un personnel qualifié leurs projets dans le domaine du bâtiment, d'où alors la mauvaise qualité du béton durci, ce qui favorise l'augmentation des défaillances structurales jusqu' à l'écroulement des ouvrages.

Notre travail de mémoire est généralement axé aux trois provinces notamment : Bujumbura Mairie, Bujumbura et Gitega où nous avons relevé des cas d'écroulement des bâtiments en construction jusqu'à avoir des pertes humaines et des biens. Pour pallier à ces risques de défaillance structurale qui, parfois arrivent au court terme, nous proposons un système de testing de la résistance mécanique du béton durci in situ par la méthode non destructive au scléromètre, avec les valeurs de la résistance à la compression obtenue après le test du béton durci, les constructeurs de bâtiments prennent les décisions d'ajouter les autres niveaux ou d'en suspendre.

Le travail est subdivisé en cinq parties : Introduction générale, Revue de la littérature, Méthodologie de l'étude expérimentale, présentation et analyse des résultats et enfin une Conclusion générale.

0. INTRODUCTION GENERALE

Au Burundi comme ailleurs, de nos jours, le béton est l'un des matériaux de construction le plus usuel. L'utilisation du béton dans les ouvrages de Génie civil s'est développée depuis le début du XXe siècle, tels que les ponts, les structures de soutènement et les infrastructures.

En effet, outre ses nombreux avantages, ce matériau exige des précautions rigoureuses du début de sa fabrication jusqu'à la fin de sa durée de vie. Le béton est un matériau qui doit être caractérisé par sa bonne résistance à la compression. Mal fait, il présente des désordres allant de la simple fissure à la rupture structurale. Actuellement, partout dans le pays, des bâtiments se construisent avec ce matériau.

Le béton est le matériau principal constituant le squelette des ouvrages de bâtiments en béton armé. Il joue un rôle prépondérant dans la portance de ces derniers. Il est caractérisé par sa bonne résistance à la compression.

Néanmoins, le béton peut être de mauvaise qualité pour plusieurs raisons telles que les matériaux utilisés, non-respect des procédés de fabrication ou une mauvaise mise en œuvre des bétons. Dans ce cas, les éléments structuraux fabriqués en béton de mauvaise qualité, peuvent présenter des défaillances structurales et sont capables d'engendrer des ruptures partielles et/ou totales d'une structure. Ces bâtiments peuvent même s'effondrer étant même en cours de construction.

0.1. Problématique

L'effondrement des bâtiments en béton armé lors de la construction peut causer des pertes financières et des pertes en vies humaines, etc.

Au Burundi, les cas d'effondrement des bâtiments en béton armé ont eu lieu. En effet, les résultats de la pré-enquête réalisée in-situ dans trois provinces (Bujumbura mairie, Bujumbura et Gitega) ont montré que des cas d'effondrement des bâtiments en béton armé en cours de construction ont réellement eu lieu.

Ainsi alors**,** notre étude consiste à identifier par recueille des données in-situ si les bétons peuvent être une des causes éventuelles de la défaillance structurale des bâtiments en béton armé au Burundi.

0.2. Objectifs de l'étude

A notre connaissance, aucune étude n'a été faite au Burundi avec objectif d'identifier la contribution des bétons dans la défaillance structurale des constructions en béton armé. C'est dans ce cadre que se situe l'intérêt de notre étude.

0. 2.1. Objectif global

L'objectif global de cette étude est d'identifier la contribution du béton dans la défaillance structurale des bâtiments en béton en armé afin de formuler des recommandations qui permettraient de prévenir des cas d'effondrement des bâtiments en béton armé au Burundi.

0.2.2. Objectifs spécifiques

Ces objectifs visent à :

- Inventorier des cas récents d'effondrement des bâtiments au Burundi ;
- Recueillir in-situ les caractéristiques mécaniques des bétons utilisés ;
- Présenter et analyser les résultats ;
- Conclure et recommander.

CHAPITRE 1. REVUE DE LA LITTERATURE

1.1. Introduction

Ce chapitre de caractère bibliographique dresse un aperçu global sur les cas et causes éventuelles d'effondrement des bâtiments d'une part au Burundi et d'autre part à travers le monde.

1.2. Paramètres pouvant conduire à la défaillance structurale du béton

Le béton est un matériau qui, pour le fabriquer, exige beaucoup de techniques et précautions telles que : le choix des matériaux, traitement de ces matériaux, dosage des composants, type de malaxage, procédé de bétonnage et suivie du béton durant le temps de prise et tenir compte aux précautions du décoffrage [1].

Ainsi, la mauvaise performance mécanique du matériau béton peut être due à plusieurs paramètres tels que :

- Le dosage à utiliser ;
- L'eau de gâchage ;
- Propreté des granulats ;
- Le malaxage des différents constituants ;
- Le transport du béton ;
- La température ambiante lors de sa réalisation ;
- Manque d'utilisation des dispositifs de serrage ;
- Absence de protection des surfaces libres en début de durcissement.

1.3. Technologie de bétonnage des éléments en béton amé au Burundi

1.3.1. Coffrage

Le coffrage est un assemblage des éléments en bois ou métalliques ayant la forme géométrique désirée servant comme une moule [2]. Ce dernier est fabriqué pour donner au béton frais la forme souhaitée après le décoffrage. Le produit fini obtenu est un élément béton durci comme par exemple : le poteau, la poutre, le plancher.

Bien que le coffrage en bois soit le plus observé dans beaucoup de chantiers des privés par rapport au coffrage métallique, il présente plus d'inconvénients que le coffrage métallique, comme pour exemple, la :

- Déformation du coffrage par faute de l'assemble moins solide ;
- Perte de la forme souhaitée ;
- Perte de laitance du béton frais.

Les photos ci-dessous montre les procédures à suivre pour faire le coffrage (Figure 1.1 – 1.2) montrent l'exemple de la réalisation des travaux de coffrage en bois.



Figure 1.1 – Photo prise 12 mai 2021 illustrant l'exemple de coffrage en bois des chainages au Burundi.



Figure 1.2 – Photo prise le 21 juin 2021 illustrant l'exemple de coffrage en bois des planchers en béton armé au Burundi.

1.3.2. Fabrication du béton au Burundi

Au Burundi, sur la plupart de chantiers, les bétonnières ne sont pas utilisées lors la fabrication du béton. Le malaxage et gâchage des constituants du béton sont généralement réalisés sur le sol nu. Et même lors du malaxage du béton, la quantité d'eau recommandée pour le gâchage du béton (Figure 1.3) n'est pas prise en compte [3].



Figure 1.3 – Photo prise en date du 26 juin 2021 montrant l'étape de malaxage du béton sur l'un des chantiers au Burundi.

1.3.3. Coulage du béton dans les coffrages au Burundi

Au Burundi, sur certains chantiers, les bétons gâchés peuvent passer plus d'une heure avant l'utilisation. Cela étant, il est connu que le béton doit être mis en œuvre aussitôt que possible après sa fabrication [4]. Tout béton qui se serait desséché ou qui aurait commencé à faire prise, devrait être normalement rejeté du chantier [5]. Les figures suivantes (Figure 1.4 – 1.5) montrent des travaux de coulage des bétons au Burundi.



Figure 1.4 - Photo prise au Burundi en date du 28 juin 2021 montrant un des moments du bétonnage d'un plancher en béton armé.



Figure 1. 5 - Photo prise au Burundi en date du 25 juin 2021 montrant un des moments du bétonnage d'un dallage du sol.

Ici, on peut noter que les techniques de bétonnage utilisées au Burundi sont encore traditionnelles. Sur différents chantiers, les matériaux fournis sont utilisés sans considération de la qualité physique et mécanique.

1.4. Provenance des matériaux et technologie de mise en œuvre du béton au Burundi

Au Burundi, les matériaux de construction sont issus des carrières et des rivières proches des chantiers en cours d'exécution [6]. Les figures (Figure 1.6 – 1.7) suivantes illustrent respectivement pour exemple la rivière Gasenyi et Nyabagere comme sources de provenance des granulats et d'eau utilisés sur des chantiers réalisés dans les environs de ces rivières.



Figure 1.6 – Photo prise en date du 26 mai 2021 illustrant la rivière Gasenyi comme source des granulats et d'eau utilisés dans la réalisation du béton.



Figure 1.7 – Photo prise en date du 26 juin 2021 illustrant la rivière Nyabagere comme source d'eau de gâchage utilisée dans la réalisation du béton.

Au Burundi, le dosage en ciment indiqué sur les sacs de ciment par les fabricants n'est donné qu'à titre indicatif. Généralement, sur les chantiers, le dosage en ciment est établi par le constructeur en fonction de la capacité financière du maitre d'ouvrage.



Figure 1.8 – Photo prise en date du 26 juin 2021 au Burundi illustrant l'étape du mélange des constituants d'un futur béton.



Figure 1.9 – Photo prise en date du 26 juin 2021 au Burundi illustrant l'étape de gâchage des constituants d'un futur béton.

1.5. Causes éventuelles d'effondrement des structures

L'écroulement se produit lorsqu'une structure ou une partie de la structure perd sa capacité à supporter des charges. Elle se fend ou se déforme ou même s'effondre complétement [7]. Certaines causes citées par exemple dans les littératures comme causes responsables de l'écroulement des immeubles sont là :

- Non adaptation des fondations ;
- Non-conformité des matériaux aux recommandations des normes.

Aussi, selon les expertises des professionnalistes en Génie civil, il est cité dans diverses littératures [8] que la défaillance structurale des constructions en cours d'exécution peut être due à :

- Une mauvaise conception structurale ;
- Une mauvaise exécution des travaux.
- Une mauvaise qualité physique et mécanique des matériaux de construction.

Les images (Figure 1.10 – 1.12) présentes ci-dessous illustrent des cas relevés sur les ouvrages consultés des bâtiments en construction qui se sont effondrés.



Figure 1.10 – Effondrement d'un immeuble en cours de construction à Toulouse en France. Date de visite 21/05/2021.



Figure 1.11 – Effondrement d'un immeuble en cours de construction à Bangladesh.



Figure 1.12 – Effondrement d'un immeuble en cours de construction à Kinshasa 26 octobre 2021.

1.6. Procédé d'auscultation des structures

In-situ, l'auscultation des structures se fait par des essais non destructifs. En génie civil, les techniques de Contrôle Non Destructif (CND) sont utilisées depuis de nombreuses années pour l'auscultation du béton [9]. Toutefois, l'évaluation des propriétés du matériau reste un défi, du fait des multiples phénomènes qui induisent des perturbations lors des mesures sur les ouvrages et du caractère variable des bétons [10].

Les techniques de Contrôle Non Destructif (CND) appliquées aujourd'hui pour l'auscultation des ouvrages en béton armé peuvent être classées en quatre groupes principaux tels que **l'ultrason**, **le rebond**, **la résistivité électrique** et le **radar** [11]. L'auscultation au scléromètre est le moyen rapide pour tester les ouvrages en béton durci.

1.7. Conclusion

L'observation des procèdes de la fabrication du béton au Burundi montre que ces derniers ne respectent pas les règles d'art. La revue de la littérature faite montre bien que l'effondrement des structures en construction peut être dû à plusieurs facteurs et le béton en fait partie.

CHAPITRE 2. METHODOLOGIE DE L'ETUDE EXPERIMENTALE

2.1 Introduction

Cette étude est basée sur le côté expérimental comprenant un essai non destructif ; rebound Schmidt hammer (scléromètre) sur site (éléments structuraux) et des essais destructifs (mécaniques) sur des éprouvettes fabriquées au laboratoire pour vérifier la fiabilité de l'essai non destructif au scléromètre. Ce chapitre comprendra :

- Une brève description des ouvrages des bâtiments sous investigation

- Des descriptions des différentes procédures d'essais :

- Rebound hammer.

- Essais mécaniques sur éprouvettes

Il est important de signaler que les essais sont réalisés suivant les normes européennes respectives :

-EN- 125042…… Rebound hammer

-EN - 206-1……Essais mécaniques sur éprouvettes suivant les instructions des fabricants des différents équipements d'essai.

2.2. Lieux d'étude

Nous avons limité notre étude, pour des raisons de temps et de moyens disponibles, aux provinces (Bujumbura mairie, Bujumbura et Gitega), et plus exactement aux bâtiments en béton armé de trois niveaux. Ces trois provinces ont donc été choisies par le fait que les cas des bâtiments en béton armé effondrés au cours de la construction ont eu lieu dans ces dernières. Les bâtiments en béton armé de trois niveaux ont été choisis pour notre étude par le fait que les cas d'effondrement relevés dans notre pré-enquête étaient des bâtiments prévus pour trois niveaux.

2.3. Matériels et méthodes utilisés pour bien mener l'étude In-situ

L'étude a commencé par pré-enquête de recueil d'informations sur les cas des bâtiments qui se sont effondrés lorsqu'ils étaient en cours de construction au Burundi. Cette pré-enquête a été menée par consultation des rapports du personnel de l'agence de protection civile et de lutte contre les catastrophes au Burundi et des informations fournies par les sites internet. Après la précédente étape, il y a identification des bâtiments de trois niveaux qui feront objet de

l'étude. En tout, 17 bâtiments ont constitué l'objet de l'étude. Des visites des chantiers ont alors été effectuées pour identifier in-situ les résistances en compression des éléments structuraux des bâtiments faisant objet d'étude. Dans les chantiers visités, nous avons chaque fois identifié le type de ciment qui était utilisé et le dosage correspondant recommandé par le fabricant dudit ciment. Pour garder l'anonymat sur le fabriquant du ciment, la désignation (A-B-C-D) a été adoptée pour différencier les ciments utilisés et seule la classe du ciment a été indiquée dans cette étude. Pour les indications (Tableau 2.1 – 2.4) sur l'utilisation du ciment, l'unité de mesure était une brouette. Une brouette de ciment équivaut à deux (2) sacs de ciment.

Tableau 2.1 – Dosage recommandé par le fabricant du Ciment A de classe (32.5)

Usage du Ciment	Ciment	sable	gravier
Béton industriel	1	2	2
Béton à solidité	1	3	3
Béton de propreté non armé.	1	4	4
Béton à faible solidité	1	5	5
Fabrication des briques ou blocs	1	8	-
Mortier pour maçonnerie et brique	1	6	-

Tableau 2.2 – Dosage recommandé par le fabricant du Ciment B de classe (42.5)

Usage du Ciment	Ciment	Sable	Gravier
Béton à forte solidité 35-40MPa	1	2	2
Béton à grande solidité 25-30 MPa.	1	2	3
Béton à solidité moyenne MPa	1	3	3
Béton à solidité faible 10-15MPa	1	3	4
Fabrication des briques	1	10	-
Mortier pour maçonnerie et brique	1	6	-

Tableau 2.3 – Dosage recommandé par le fabricant du Ciment C de classe (42.5)

Usage du Ciment	Ciment	Sable	Gravier
Béton à forte solidité 35-40MPa	1	2	2
Béton à grande solidité 25-30 MPa.	1	2	3
Béton à solidité moyenne MPa	1	3	3
Béton à solidité faible 10-15MPa	1	4	4

Fabrication des briques	1	10	-
Mortier pour maçonnerie et brique	1	6	-

Tableau 2.4 – Dosage recommandé par le fabricant du Ciment D de classe (42.5)

Usage du Ciment	Ciment	Sable	Gravier
Béton à forte solidité 35-40MPa	1	2	2
Béton à grande solidité 25-30 MPa.	1	2	3
Béton à solidité moyenne MPa	1	3	3
Béton à solidité pas très forte 10-15MPa	1	4	4
Fabrication des briques	1	10	-

Pendant l'étude, nous avons cherché à reconnaître le personnel aligné sur les différents chantiers visités par questionnement du personnel rencontré sur ces chantiers. Aussi, pour avoir des renseignements sur la mise en œuvre des bétons, une série de questions sous forme de fiche d'enquête a été élaborée (Annexe 1) et remplit après questionnement.

Pour recueillir des résistances en compression des poteaux, poutres et dalles des bâtiments faisant objet d'étude, nous avons utilisé le Scléromètre (Figure 2.3) selon le protocole décrit par la norme « NF-EN-12504-2 ».



Figure 2.1 – Scléromètre utilisé dans l'identification des résistances en compression du béton des colonnes, poutres et dalles des bâtiments concernés par l'étude.

Dans cette étude, les bâtiments de trois niveaux ont été retenus comme structures objets d'étude par le fait que tous les bâtiments effondrés relevés étaient de trois niveaux. Sur chaque chantier, nous avons mesuré la dureté des éléments structuraux (poteaux, poutres et dalles) afin d'estimer les résistances en compression (Figure 3.2).

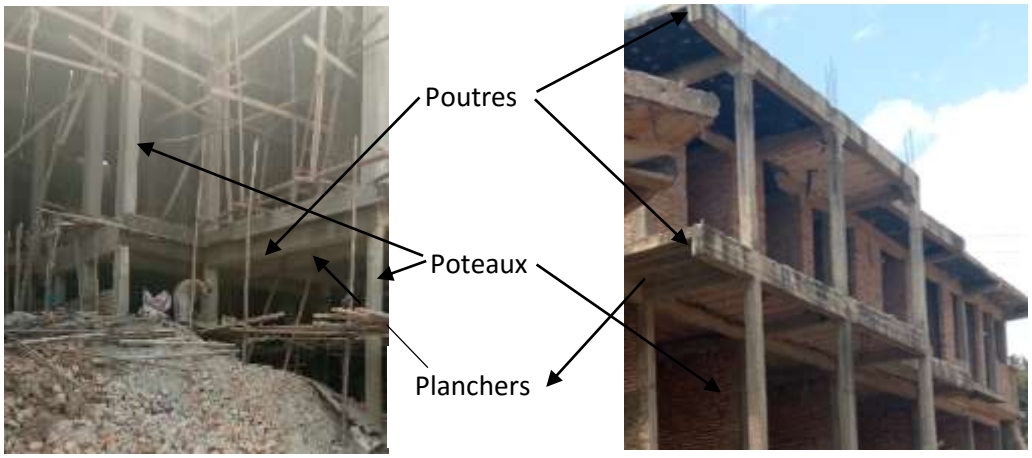


Figure 2.2 – Photos d'indication des éléments structuraux qui ont objet d'étude.

Les poteaux plus chargés ont été choisis pour être testés. Pour les poutres, les travées ont servi de points de mesure de la dureté du béton. Les milieux des panneaux des dalles ont servi aussi des points de mesure de la dureté du béton pour la future définition de la résistance en compression du béton.

La valeur de l'indice de rebondissement doit être corrigée si l'ouvrage testé n'est pas vertical. (Voir figure ci-dessous).

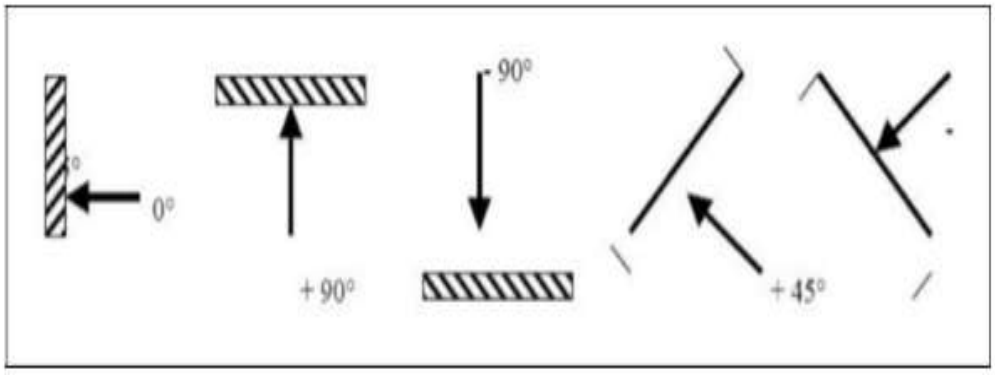


Figure 2.3 – Essai au scléromètre sur des éléments de déférents angles d'inclinaison

Tableau 2.5 – Correction de la valeur de l'indice de rebondissement en fonction de l'angle d 'inclinaison

Indice de rebondissement	Correction de la valeur de l'indice de rebondissement pour les différents angles d'inclinaison de l'appareil			
	Essais vers le haut		Essais vers le bas	
	+90°	+45°	-90°	-45°
20	Non valable	Non valable	+2,4	+3,2
>20	-5,4	-3,5	+2,4	+3,4
>30	-4,7	-3,3	+2,3	+3,1
>40	-3,9	-2,0	+2,0	+2,7
>50	-3,1	-2,1	+1,6	+2,2

- Relevé des mesures sur ouvrage

La surface de mesure doit être divisée en zones de 400 cm^2 au moins.

Chaque zone est structurée en un grillage de points de mesure ayant pour espacement d = 30÷50 mm Les points de mesures extrêmes doivent être au moins à 30 mm des bords de la surface testée.

- Points de mesures :

Le nombre de points de mesures dépend des dimensions de l'ouvrage testé. Pour un grand panneau (dalle) les points de mesure sont situés aux intersections d'un quadrillage d'une maille de 0,5 m, dans le cas des petits éléments (poteaux, poutres.) les mesures se font en six points.

$d = 30 \div 50 mm$

$S \geq 400\ cm^2$

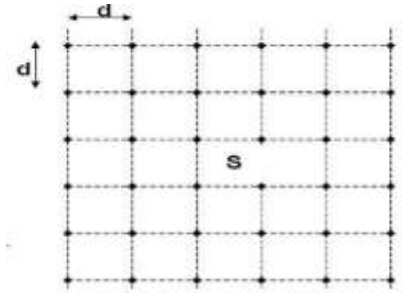


Figure 2.4 – Grille de mesure sur ouvrage

Les mesures de rebond ont été effectuées à l'aide d'un scléromètre industriel de type marteau SCHMIDT 2000 (Figure 2.1). Les mesures de rebond ont été effectuées sur quatre différentes faces latérales pour les poteaux.

Ici dessous les photos suivantes montrent quelques-unes des étapes de mesurage des duretés in-situ des bétons des bâtiments ayant fait objets de cette étude.



Figure 2.5 – Photos montrant l'exemple de mesurage de la dureté du béton pour l'ultérieure définition de la résistance en compression du béton.

Sur chaque élément testé, dix mesures ont été effectuées. Et c'est en fonction du rebondissement moyen (Rm) que nous avons estimé la résistance à la compression à l'aide de l'abaque suivant (Figure 2.2). Pendant les campagnes de mesurage, le nombre de poteaux, poutres et dalles était compris entre 6 et 8.



Figure 2.6 – Abaque sur le scléromètre permettant de définir la résistance en compression du béton à partir de la mesure de rebond.

Ces trois lignes sont des courbes servant d'estimer la résistance à la compression du béton. La ligne de bas est utilisé quand la position suivie pour auscultation est verticale vers le haut, la deuxième ligne est utilisée pour les mesures horizontales et la trois ligne est utilisée pour les positions verticales se dirigeant vers le bas. On estimait alors la résistance en compression par interpolation. Les caractéristiques mécaniques ont été synthétisées dans des tableaux après traitement.

Ici, nous tenons à rappeler que cette étude devrait être faite sur beaucoup de chantiers possibles, mais elle a été limitée dans le temps et dans l'espace par nombreuses difficultés. Nous pouvons citer ici essentiellement que faute de moyens financiers, nous avons pu recueillir des données dans d'autres provinces, autres que les trois citées. Nous signalons ici aussi que

dans certains cas, des chefs de chantiers ne nous ont pas donné l'accès d'entrer dans leurs chantiers en cours de construction sous leur suivi.

2.4. Identification des matériaux locaux au laboratoire

Pour identifier les caractéristiques des matériaux, nous avons prélevés dans les différents chantiers étudiés en cours de construction les granulats provenant des Rivières Gasenyi et Gikoma toute de la commune Mutimbuzi. Ces granulats sont des matériaux roulés extraits dans lesdites rivières. Les ciments utilisés sont les Ciments Portland Composés CPJ de classe 32.5 et 42.5. L'eau de gâchage est du robinet. Nous avons procédé dans un premier temps à des essais de caractérisation de matériaux dans le laboratoire des matériaux de Construction (LMC) de la Faculté des sciences de l'Ingénieur de l'Université du Burundi.

2.4.1. Ciment

Caractéristiques physiques de ciment utilisé : Le ciment utilisé dans notre étude est le ciment CPJ 32,5 R et 42,5 N.

2.4.2. Caractéristiques physiques de sable roulé : provenant de la rivière Gasenyi

L'analyse des caractéristiques granulométrique pour l'identification des matériaux a été réalisée au niveau du laboratoire des matériaux (LMC).

Tableaux 2.6 – Analyse granulométrique du (sable roulé de la Rivière Gasenyi).

Analyse granulométrique du sable (Echantillon de 6320 g de la rivière gasenyi)					
Tamis (mm)	passant partiel(g)	Refus partiel (g)	Refus cumulé (g)	Réfus cumulé (%)	Passant (%)
50					
31.5					
25					
20	6 320	0	0	-	100.00
16	5 500	820	820	12.97	87.03
8	4 620	880	1 700	26.90	73.10
2	3 840	780	2 480	39.24	60.76
1	2 990	850	3 330	52.69	47.31
0.8	2 080	910	4 240	67.09	32.91
0.25	1 020	1 060	5 300	83.86	16.14
0.125	220	800	6 100	96.52	3.48
0.063	30	190	6 290	99.53	0.47
Fond du tamis	-	30	6 320	100.00	-

Tableaux 2.7 – Analyse granulométrique du (sable roulé de la rivière Gikoma).

Analyse granulométrique du sable (Echantillon de 5000 g de la rivière Gikoma)					
Tamis (mm)	passant (g)	Refus partiel (g)	Refus cumulé (g)	Réfus cumulé (%)	Passant (%)
50					
31.5					
25	5 000	-	-	-	100.00
20	4 470	530	530	10.60	89.40
16	3 620	850	1 380	27.60	72.40
8	3 150	470	1 850	37.00	63.00
2	2 560	590	2 440	48.80	51.20
1	2 040	520	2 960	59.20	40.80
0.8	990	1 050	4 010	80.20	19.80
0.25	710	280	4 290	85.80	14.20
0.125	340	370	4 660	93.20	6.80
0.063	200	140	4 800	96.00	4.00
Fond du tamis	-	200	5 000	100.00	-

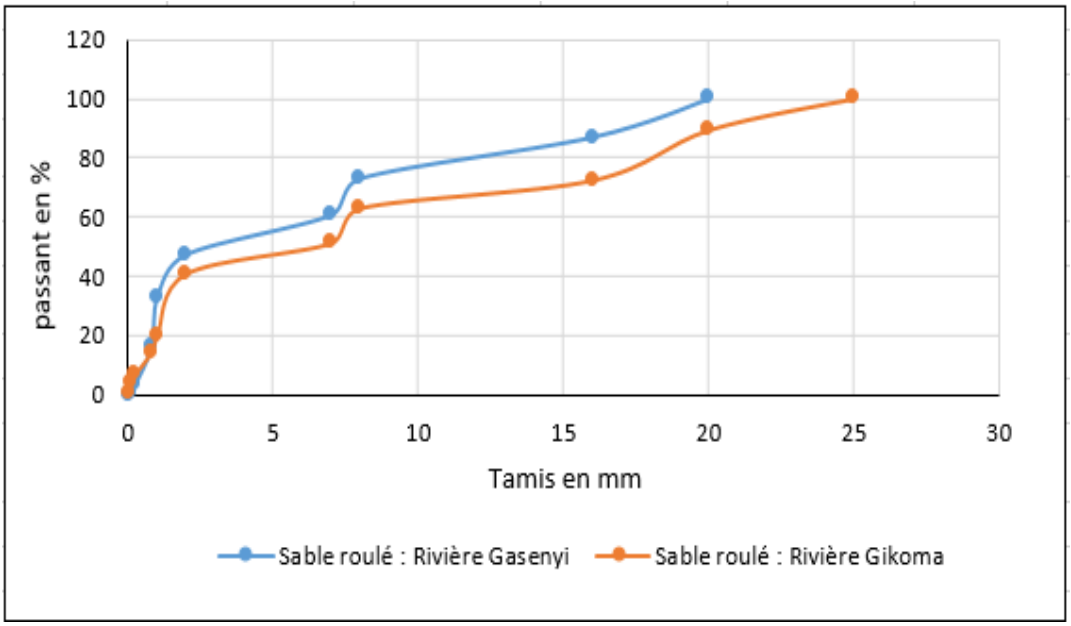


Figure 2.7 – Analyse granulométrique du (sable roulé des Rivières Gasenyi et Gikoma).

Nous constatons que les sables roulés de la Rivière Gasenyi contiennent un pourcentage important de particules très fin par rapport au sable roulé provenant de la Rivière Gikoma.

2.4.3. Masse volumique apparente : norme (EN 18-554)

La masse volumique apparente d'un matériau qui est la masse volumique d'un mètre cube du matériau pris en tas, comprenant à la fois des vides perméables et imperméables des particules ainsi que les vides entre particules[12] a été aussi déterminée au niveau du laboratoire des matériaux de construction .

$$P_{(app)} = \frac{M}{V} = \frac{M_t - M_{récipient}}{V} \text{ (g/cm}^3\text{)}$$

Tableau 2.8 – masse volumique apparente du Sable des Rièvière (Gasenyi et Gikoma) .

Sable	M(g)	V(cm^3)	Mvapp moyenne (g/cm^3)
Sable de la Rivière Gasenyi	2100	1000	2.107
	2112.66		
	2107.66		
Sable de la Rivière Gikoma	2173.91	1000	2.174
	2105.33		
	2242.49		

Nous remarquons que la masse volumique apparente du sable de la Rivière Gasenyi est petite par rapport au sable de la Rivière Gikoma.

2.4.4. Masse volumique absolue : norme (EN 18-301)

Pour déterminer la masse volumique absolue ρs qui est la masse par unité de volume de la matière qui constitue le granulat, sans tenir compte des vides pouvant exister dans ou entre des grains. La masse volumique absolue du sable nous l'avons déterminé au laboratoire par la formule : ρ_{abs} (g/cm^3) = M / (V_1-V_2)

Tableau 2. 9 – Masse volumique absolue du Sable des Rivières Gasenyi et Gikoma

Sable	M(g)	V1(cm^3)	V2(cm^3)	Mvabs moyenne (g/cm^3)
Sable de la Rivière Gasenyi	6250	3000	390	2.395
Sable de la Rivière Gikoma	5000	2400	330	2.415

Nous remarquons que la masse volumique absolue du sable de la Rivière Gikoma est grande par rapport au sable de la Rivière Gasenyi (si le volume est petit donc la masse volumique est grande).

2.4.5. L'équivalent de sable : norme (EN 933-8)

Nous avons aussi effectué l'essai d'équivalent de sable au laboratoire qui consiste à séparer les floculats fins contenues dans le sable. Une procédure normalisée permet de déterminer un coefficient d'équivalent de sable qui quantifie la propreté de celui-ci.

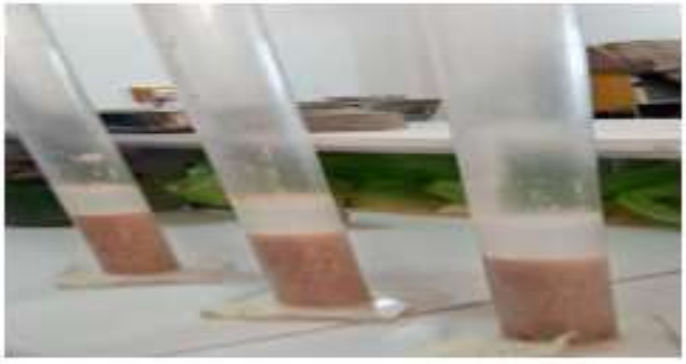


Figure 2.8 – Essais d'équivalent de sable

Pour déterminer l'équivalent de Sable, nous avons utilisé l'expression suivante : $E.S = \frac{h_1}{h_2} * 100$, plus le sable est propre et plus E.S est élevé.

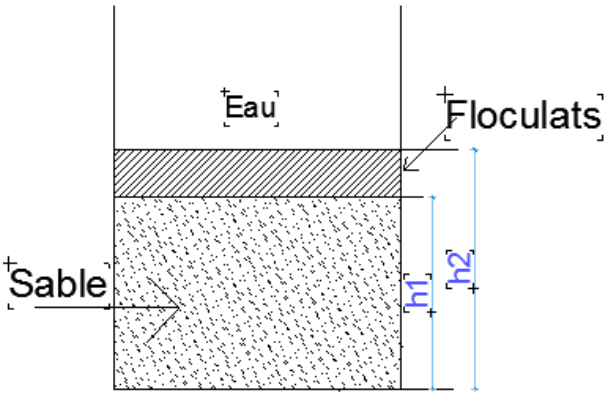


Figure 2.9 – Illustration schématique d'équivalent de sable

Tableau 2. 10 – Résultats essais d'équivalent de sable

Echantillon	h1 (cm)	h2 (cm)	ESV%= 100h1/h2
Sable de la Rivière Gasenyi	10.60	15.00	70.67
Sable de la Rivière Gikoma	11.7	15	78.00

D'après les résultats de cet essai, nous pouvons constater que : Sable roulé :

ESV ≤ 80, nous constatons ici que le Sable est moins propre : la présence de fines argileuses risque d'entrainer un défaut de plasticité de béton.

2.5. Gravier roulé : Provenant de la Rivière Gasenyi

2.5.1. Caractéristiques physiques de gravier :

Nous avons également effectué l'analyse granulométrique du gravier au niveau du laboratoire (LMC). Le Gravier provenant de la rivière Gasenyi a été choisi dans notre étude par le fait que dans la plupart de bâtiments étudiés ont été construits en matériaux extraits dans cette dernière.

Tableau 2. 11 – Analyse granulométrique du Gravier

Analyse granulométrique du gravier (Echantillon de 7500g de la rivière gasenyi)					
Tamis (mm)	passant (g)	Refus partiel (g)	Refus cumulé (g)	Réfus cumulé (%)	Passant (%)
50					
31.5	6 750	750	750	10.00	90.00
25	6 320	430	1 180	15.73	84.27
20	5 630	690	1 870	24.93	75.07
16	4 110	1 520	3 390	45.20	54.80
8	2 800	1 310	4 700	62.67	37.33
7	2 020	780	5 480	73.07	26.93
2	1 170	850	6 330	84.40	15.60
1	410	760	7 090	94.53	5.47
0.8	175	235	7 325	97.67	2.33
0.25	77	98	7 423	98.97	1.03
0.125	45	32	7 455	99.40	0.60
0.063	45	20	7 475	99.67	0.60
Fond du tamis	-	25	7 500	100.00	-

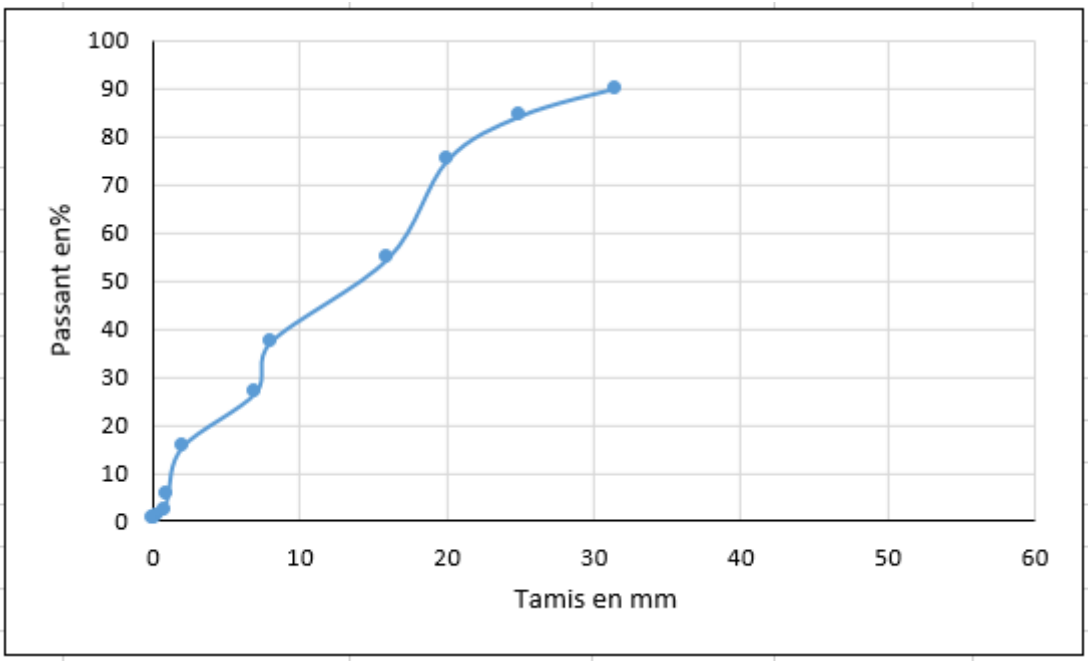


Figure 2.10 – Analyse granulométrique gravier roulé de la Rivières Gasenyi .

2.5.2. Masses volumiques apparentes : norme (NF EN 12620).

Nous avons suivi la même procédure que celle précédente pour déterminer la masse apparente des Graviers. La masse volumique apparente d'un matériau qui est la masse volumique d'un mètre cube du matériau pris en tas, comprenant à la fois des vides perméables et imperméables des particules ainsi que les vides entre particules.



Figure 2. 11 – Masses volumiques apparentes des Gravier roulé.

Tableaux 2.12 – Masse volumique apparente de Gravier

Sable	M(g)	V(cm^3)	Mvapp moyenne (g/cm^3)
Sable de la Rivière Gasenyi	2450 2470 2580	1160	2.155

D'après les résultats de cet essai, selon la norme (NF EN 12620), nous remarquons que si le volume est grand et la masse volumique d'un matériau diminue.

2.5.3. Masses volumiques absolues

Pour déterminer la masse volumique absolue ρs qui est la masse par unité de volume de la matière qui constitue le granulat, sans tenir compte des vides pouvant exister dans ou entre des grains [13]. La masse volumique absolue du gravier nous l'avons déterminée au Laboratoire par la formule : ρ_{abs} (g/cm^3) = M / (V_1-V_2)

Tableaux 2. 13 – Masse volumique absolue de classes des Graviers.

Sable	M(g)	V1(cm^3)	V2(cm^3)	Mvabs moyenne (g/cm^3)
Sable de la Rivière Gasenyi	7500	3500	570	2.560

La masse volumique absolue du Gravier selon la norme NF EN 12620 est comprise entre «2500 kg/m3 et 2800 kg/m^3 ».

2.6. Fabrication du béton au laboratoire

Ensuite pour continuer l'étude au laboratoire, nous avons utilisés les échantillons (graviers, sable) prélevés dans certains chantiers faisant objet de notre étude. Ces échantillons prélevés ont été utilisés pour faire la formulation du béton afin de fabriquer les éprouvettes servant à la détermination des résistances mécaniques.

2.6.1. Formulation du béton

Le dosage en ciment que nous avons procédé était de l'ordre de 350kg/ m^3. Le mélange granulaire optimal retenu après plusieurs compositions théoriques compte tenu des moyens de fabrication et de mise en œuvre est défini comme suit : - sable : 0.125/4

- gravier : 2/31.5

- Ciment utilisé : dosage 350kg/m^3

2.6.2. Proportion volumique

Hypothèse de calcul :

- dosage en ciment (kg/ m^3) 350.00

- D max (mm) 31.5.00

- résistance souhaitée (MPa) (sur Cube en ciment de 42.5) 35.00

- résistance souhaitée (MPa) (sur Cube en ciment de 32.5) 25.00

- rapport ciment/eau (C/E) 1.94

- rapport gravier /sable(G/S) 1.5

2.6.3 Résultats des essais granulométriques pour la formulation du béton

Tableaux 2. 14 – Résultats des essais granulométriques du sable.

Résultat d'Analyse granulométrique du sable (Echantillon de 2500 g de la rivière Gasenyi				
Diamètre des tamis (mm)	Refus partiel(g)	Réfus cumulé (g)	Réfus cumulé (%)	Passant (%)
16	0	0	0	100
8	0	0	0	100
4	160	160	8	92
2	160	320	16	84
1	300	620	31	69
0.5	550	1170	58.5	41.5
0.25	840	2010	110	23.5
0.125	390	2400	11.96	17

Tableaux 2. 15 – Résultats des essais granulométriques des graviers.

Analyse granulométrique du gravier (Echantillon de 3500 g de la rivière Gasenyi				
Diamètre des tamis (mm)	Refus partiel(g)	Réfus cumulé (g)	Réfus cumulé (%)	Passant (%)
63	0	0	0	100
31.5	130	130	6.5	93.5
16	670	800	40	60
8	780	1580	79	21
4	320	1900	95	5
2	70	1970	98.5	1.5

Pour l'analyse granulaire type AFNOR (linéaire en module et logarithme en dimension des granulats), nous traçons une composition granulaire de référence OAB de béton (granulat de rivière Gasenyi).

Le point B (à l'ordonnée 100%) correspond à la dimension D du plus gros granulat et le point de brisure A a pour coordonnées ainsi définies :

-en abscisse (à partir de la dimension D tamis) si D ≤ 20mm l'abscisse est $\frac{D}{2}$

Si D ≥ 20mm l'abscisse est située au milieu du << segment gravier >>

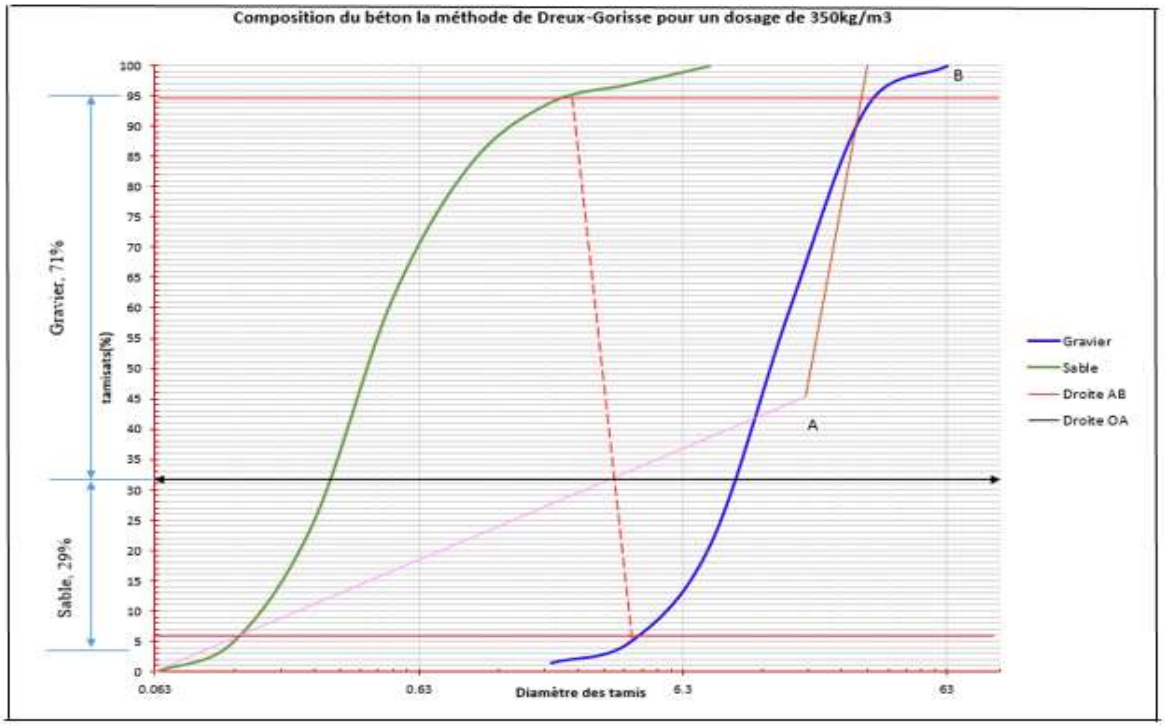


Figure 2. 12 – courbes granulométriques (sable et gravier de la rivière gasenyi).

2.6.4. Confection des éprouvettes

Nous avons d'abord fabriqué les moules puis confectionner le béton pour constituer les éprouvettes. Ainsi, les éprouvettes sont noyées dans l'eau jusqu'à le jour prévu pour écrasement.



Figure 2.13 – Confection des éprouvettes de béton.

2.6.5. Essais destructifs (essai de compression sur éprouvettes)

Les essais de résistance à la compression ont été réalisés au laboratoire des matériaux de construction de la Faculté des Science de l'Ingénieur (FSI). La résistance maximale en compression Rc (MPa) est l'une des propriétés les plus importantes du béton. La résistance à la compression est réalisée sur un béton de 14 et 28jours par une presse.

Pour obtenir des résultats comparatifs en compression il est nécessaire d'employer des éprouvettes de forme, de dimensions et de mode d'obtention identiques, et de les soumettre à essais dans des conditions bien définies de traitement préalable, de température, d'humidité et de vitesse de mise en charge [14].

- Méthodologie :

Les éprouvettes cubiques sont alors passées dans la presse pour être écrasées.

- Matériel nécessaire pour l'essai :

- une presse de compression. - éprouvettes en béton



Figure 2.14 – Essai d'écrasement à la presse

Conduite de l'essai :

Placez l'éprouvette dans le dispositif de compression avec une face latérale de moulage sur chaque enclume d'appui. - Abaissez manuellement la grosse vis jusqu'au contact du plateau supérieur avec le bâti de compression. - Fermez la porte de sécurité et la vanne d'évacuation. - Tournez la vanne de vitesse de mise en charge au minimum. - Mettre la pompe en route. - Laissez ainsi jusqu'à rupture relevez la valeur de la charge maxi Fc.

La résistance en compression Rc en (Mpa) est donnée par la formule : Rc = Fc/s. Fc est la charge appliquée sur l'éprouvette à la rupture en N S est la surface comprimée (éprouvette ou carotte).

En fin, nous comparons les résistances mécaniques obtenues au scléromètre avec les résistances obtenues par la compression au laboratoires pour vérifier la fiabilité de la méthode non destructive au scléromètre.

2.7. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons pu montrer d'une façon générale les matériels, les méthodes et surtout la démarche méthodologique utilisées pour mener à bien cette étude.

CHAPITRE 3. PRESENTATION ET ANALYSE DES RESULTATS

3.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons et analysons les résultats obtenus. Les discussions faites permettent de mettre en évidence la contribution du béton dans l'effondrement des bâtiments en béton armé au Burundi.

3.2. Identification des cas d'écroulement des bâtiments au Burundi

Des cas d'effondrement de bâtiments en cours de constructions au Burundi ont été identifiés. Six (6) cas connus d'effondrement de bâtiments ont été répertoriés. Selon leur appartenance, on remarque que 100% des bâtiments qui se sont effondres étaient des bâtiments appartenant à des privés. 66%, 17% et 17% des cas d'effondrement des bâtiments connus et inventories dans cette étude ont lieu respectivement dans la province de Bujumbura Mairie, Bujumbura et Gitega.

Certaines images des bâtiments en béton armé qui sont écroulés en construction au Burundi ont été prises (Figure 3.1), (Figure 3.2), (Figure 3.3) et (Figure 3.4).



Figure 3.1 – Bâtiment effondré à Buterere, le 16 mai 2018, Quartier Miroir, source agence de protection civile.



Figure 3.2 – Partie effondrée d'un immeuble au cours d'exécution au quartier Winterekwa , zone Kamenge, commune Ntahangwa.

L'effondrement a eu lieu la nuit du 08 novembre 2013, date de prise : 14/ 06/ 2021



Figure 3.3 – Un immeuble effondré au cours d'exécution au quartier Kibenga.

Pour ce cas d'effondrement, on n'a pas pu obtenir des informations sur le bilan dégâts, date de prise : 14/ 06/ 2021



Figures 3.4 – Ruine des poteaux des immeubles en construction au Burundi**.**

Source : agence de protection civile et de lutte contre les catastrophes à Bujumbura

3.3. Ciments usuels au Burundi

Comme l'a révélé l'étude faite, les types de ciment utilisés au Burundi sont de deux classes de résistance. Il s'agit des classes de résistance (32.5) et (42.5). L'observation des propositions de dosage fournis par les fabricants de ciment montre que pour le béton industriel par exemple, que les fabricants recommandent l'utilisation de deux brouettes de sable pour une brouette de ciment tous les types de classe [(32.5) et (42.5)] de ciment alors ceux derniers n'ont pas les mêmes propriétés mécaniques.

3.4. Qualification de la main d'œuvre

Pour les chantiers investigués ici, nous avons remarqué qu'il n'y avait aucun Ingénieur, chef de chantier. Et même il n'y avait aucun conducteur des travaux formé pour cette activité. Les chantiers étaient sous la supervision des personnes généralement appelées « Tacherons » sans aucune formation en Génie civil.

3.5. Procédure de fabrication du béton

Le malaxage des matériaux était non mécanisé pour la plupart des chantiers visités. Les granulats utilisés étaient de deux natures. Il s'agissait soit des granules enroulés ou des granulats concassés. Visuellement, on pouvait remarque que la granulométrie des granulats n'était pas observée. L'eau était ajoutée à la volée et surtout une quantité jugée grande d'eau était utilisée pour avoir une patte trop molle facilement manipulable.

3.6. Résistances mécaniques des bétons mesurées au scléromètres

Les résultats des différentes campagnes de mesurage ont étés recueillis dans les tableaux présentés ci-dessous.

Tableau 3.1 – Résultats des valeurs de résistance en compression du béton sur les éléments structuraux du chantier No1.

Chantier 1	élément	âge [*en jour*]	Section[*cm*]	Rebond moyen [R_m]	f_c mesurée [*MPa*]	f_{cm} moyenne [*MPa*]
I.1 Poteau	P1	55	30*30	42	53	53.66
	P2	55	30*30	46	61	
	P3	55	30*30	41	51	
	P4	58	30*30	42	53	
	P5	58	30*30	41	51	
	P6	58	30*30	42	53	
I.2 poutre	B1	40	20*50	32	36	36.30
	B2	40	20*50	31	34	
	B3	40	20*50	33	37	
	B4	40	20*50	32	36	
	B5	40	20*50	31	34	
	B6	40	20*50	33	37	
	B7	40	20*50	35	40	
I.3 Dalle	D1	40	20	32	35	34.14
	D2	40	20	31	34	
	D3	40	20	34	39	
	D4	40	20	30	33	
	D5	40	20	33	37	
	D6	40	20	29	31	
	D7	40	20	24	30	

Pour le 1er Bâtiment, trois types d'ouvrages ont été testés notamment les poteaux, les poutres et les dalles. Ainsi, le tableau de résultats est composé des éléments suivants : éléments structuraux, âge du béton, section, valeurs moyennes de rebondissement, les résistances à la compression et les résistance moyennes.

En effet, pour les trois cas, les éléments structuraux testés varient de 6 à 7, l'âge du béton varie de 40 jours à 48 jours, les sections sont 20*25cm pour les poteaux et 20*30cm pour les poutres et 15cm d'épaisseur pour les dalles, les valeurs moyennes de rebondissement varient de 31 à 46, les résistances mesurées varient de 31 à 61MPa et les résistances mécanique moyennes varient de 34.14 à 53.66MPa.

Tableau 3.2 – Résultats des valeurs de résistance en compression du béton sur les éléments structuraux du chantier No2.

Chantier 2	élément	âge [*en jour*]	Section[*cm*]	Rebond moyen [R_m]	f_c mesurée [*MPa*]	f_{cm} moyenne [*MPa*]
II.1 Poteau	P1	75	20*20	38	46	47.5
	P2	75	20*20	42	51	
	P3	75	20*20	37	46	
	P4	78	20*20	36	45	
	P5	78	20*20	40	49	
	P6	78	20*20	39	48	
II.2 poutre	B1	35	20*30	31	34	33
	B2	35	20*30	27	27	
	B3	35	20*30	29	31	
	B4	35	20*30	32	35	
	B5	35	20*30	31	34	
	B6	35	20*30	26	36	
	B7	35	20*30	31	34	
II.3 Dalle	D1	35	15	20	24	27
	D2	35	15	20	24	
	D3	35	15	24	30	
	D4	35	15	24	30	
	D5	35	15	24	30	
	D6	35	15	20	24	

Pour le 2ème Bâtiment, trois types d'ouvrages ont été aussi testés notamment les poteaux, les poutres et les dalles. Ainsi, le tableau de résultats est composé des éléments suivants : éléments structuraux, âge du béton, section, valeurs moyennes de rebondissement, les résistances à la compression et les résistance moyennes.

En effet, pour les trois cas, les éléments structuraux testés varient de 6 à 7, l'âge du béton varie de 35 jours à 78 jours, les sections sont 20*20cm pour les poteaux et 20*30cm pour les poutres et 15cm d'épaisseur pour les dalles, les valeurs moyennes de rebondissement varient de 20 à 42, les résistances mesurées varient de 24 à 51MPa et les résistances mécanique moyennes varient de 27 à 47.5MPa.

Tableau 3.3 – Résultats des valeurs de résistance en compression du béton sur les éléments structuraux du chantier No3.

Chantier 3	élément	âge [*en jour*]	Section[*cm*]	Rebond moyen [R_m]	f_c mesurée [*MPa*]	f_{cm} moyenne [*MPa*]
III.1 Poteau	P1	65	30*30	28	30	22.83
	P2	65	20*30	27	28	
	P3	65	20*30	21	20	
	P4	75	20*30	22	21	
	P5	75	20*30	20	18	
	P6	75	20*30	21	20	
III.2 poutre	B1	45	20*30	31	34	34.5
	B2	45	20*30	30	34	
	B3	45	20*30	33	37	
	B4	40	20*30	31	34	
	B5	40	20*30	31	34	
	B6	40	20*30	31	34	
III.3 Dalle	D1	45	15	25	31	28.5
	D2	45	15	20	24	
	D3	45	15	20	24	
	D4	40	15	24	30	
	D5	40	15	24	30	

Pour le 3ème Bâtiment, l'étude a été faite sur les structuraux (poteaux et poutres, dalles). Ainsi, le tableau de résultats est composé des éléments suivants : éléments structuraux, âge du béton, section, valeurs moyennes de rebondissement, les résistances à la compression et les résistance moyennes.

En effet, les éléments structuraux testés varient de 6 à 7, l'âge du béton varie de 40 jours à 75 jours, les sections sont 30*30cm pour les poteaux et 20*50cm pour les poutres et 15cm d'épaisseur pour les dalles, les valeurs moyennes de rebondissement varient de 20 à 33, les résistances mesurées varient de 24 à 30MPa et les résistances mécanique moyennes varient de 22.83 à 34.5MPa.

Tableau 3.4 – Résultats des valeurs de résistance en compression du béton sur les éléments structuraux du chantier No4.

Chantier 4	élément	âge [*en jour*]	Section[*cm*]	Rebond moyen [R_m]	f_c mesurée [*MPa*]	f_{cm} moyenne [*MPa*]
IV.1 Poteau	P1	70	25*25	36	43	43.83
	P2	70	25*25	37	46	
	P3	70	25*25	39	48	
	P4	75	25*25	34	39	
	P5	75	25*25	36	43	
	P6	75	25*25	37	44	
IV.2	B1	40	20*30	36	42	43
	B2	40	20*30	37	44	
	B3	40	20*30	39	47	
	B4	40	20*30	34	39	
	B5	40	20*30	35	41	
	B6	40	20*30	38	45	
IV.3 Dalle	D1	40	20	32	43	39
	D2	40	20	31	39	
	D3	40	20	29	38	
	D4	40	20	30	39	
	D5	40	20	28	36	
	D6	40	20	31	39	

Pour le 4ème Bâtiment, l'étude a été aussi faite sur les structuraux notamment les poteaux, les poutres et les dalles. Ainsi, le tableau de résultats est composé des éléments suivants : éléments structuraux, âge du béton, section, valeurs moyennes de rebondissement, les résistances à la compression et les résistance moyennes.

En effet, six éléments structuraux ont été testés, l'âge du béton varie de 40 jours à 70 jours, les sections sont 25*25cm pour les poteaux et 20*30cm pour les poutres et 20cm d'épaisseur pour les dalles, les valeurs moyennes de rebondissement varient de 28 à 39, les résistances mesurées varient de 36 à 48 MPa et les résistances mécanique moyennes varient de 39à 43.83MPa.

Tableau 3.5 – Résultats des valeurs de résistance en compression du béton sur les éléments structuraux du chantier No5.

Chantier 5	élément	âge [*en jour*]	Section[*cm*]	Rebond moyen [R_m]	f_c mesurée [*MPa*]	f_{cm} moyenne [*MPa*]
V.1 Poteau	P1	80	20*25	28	29	28
	P2	80	20*25	27	28	
	P3	80	20*25	26	27	
	P4	83	20*25	28	29	
	P5	83	20*25	26	27	
	P6	83	20*25	26	28	
V.2 poutre	B1	50	20*30	31	33	37.83
	B2	50	20*30	32	35	
	B3	50	20*30	33	42	
	B4	50	20*30	30	39	
	B5	50	20*30	29	38	
	B6	50	20*30	31	40	
V.3 Dalle	D1	40	20	23	28	31.33
	D2	40	20	24	30	
	D3	40	20	26	33	
	D4	40	20	24	30	
	D5	40	20	28	36	
	D6	40	20	25	31	

Pour le 5ème Bâtiment, trois types d'ouvrages ont été testés notamment les poteaux, les poutres et les dalles. Ainsi, le tableau de résultats est composé des éléments suivants : éléments structuraux, âge du béton, section, valeurs moyennes de rebondissement, les résistances à la compression et les résistance moyennes.

En effet, pour les trois cas, six éléments structuraux ont été testés, l'âge du béton varie de 40 jours à 80 jours, les sections sont 20*20cm pour les poteaux et 20*30cm pour les poutres et 20cm d'épaisseur pour les dalles, les valeurs moyennes de rebondissement varient de 23 à 33, les résistances mesurées varient de 27 à 42 MPa et les résistances mécanique moyennes varient de 28 à 37.83MPa.

Tableau 3.6 – Résultats des valeurs de résistance en compression du béton sur les éléments structuraux du chantier No6.

Chantier 6	élément	âge [*en jour*]	Section [*cm*]	Rebond moyen [R_m]	f_c mesurée [*MPa*]	f_{cm} moyenne [*MPa*]
VI.1 Poteau	P1	75	20*20	21	20	22.5
	P2	75	20*20	21	20	
	P3	75	20*20	25	24	
	P4	75	20*20	23	23	
	P5	75	20*20	26	27	
	P6	75	20*20	22	21	
VI.2 poutre	B1	45	20*30	25	26	27.83
	B2	45	20*30	29	31	
	B3	45	20*30	28	31	
	B4	45	20*30	24	23	
	B5	45	20*30	28	29	
	B6	45	20*30	27	27	
VI.3 Dalle	D1	45	15	25	31	33.66
	D2	45	15	24	30	
	D3	45	15	27	34	
	D4	45	15	28	36	
	D5	45	15	26	33	
	D6	45	15	29	38	

Pour le 6ème chantier, trois types d'ouvrages ont été testés : les poteaux, les poutres et les dalles. Ainsi, le tableau de résultats est composé des éléments suivants : éléments structuraux, âge du béton, section, valeurs moyennes de rebondissement, les résistances à la compression et les résistance moyennes.

En effet, pour les trois cas, six éléments structuraux ont été testés, l'âge du béton varie de 45 jours à 75 jours, les sections sont 20*20cm pour les poteaux et 20*30cm pour les poutres et 15 cm d'épaisseur pour les dalles, les valeurs moyennes de rebondissement varient de 21 à 29, les résistances mesurées varient de 20 à 38 MPa et les résistances mécanique moyennes varient de 22.50 à 33.66MPa.

Tableau 3.7 – Résultats des valeurs de résistance en compression du béton sur les éléments structuraux du chantier No7.

Chantier 7	élément	âge [*en jour*]	Section[*cm*]	Rebond moyen [R_m]	f_c mesurée [*MPa*]	f_{cm} moyenne [*MPa*]
VII.1 Poteau	P1	67	20*30	21	20	21
	P2	67	20*30	20	18	
	P3	67	20*30	24	24	
	P4	67	20*30	21	20	
	P5	70	20*30	21	20	
	P6	70	20*30	25	24	
	P7	70	20*30	23	23	
	P8	72	20*30	21	20	
	P9	72	20*30	21	20	
VII.2 poutre	B1	45	20*30	29	26	25.5
	B2	45	20*30	20	17	
	B3	45	20*30	20	31	
	B4	45	20*30	22	23	
	B5	45	20*30	21	29	
	B6	45	20*30	22	27	
VII.3 Dalle	D1	45	15	18	22	23.16
	D2	45	15	19	23	
	D3	45	15	25	31	
	D4	45	15	15	17	
	D5	45	15	21	24	
	D6	45	15	20	22	

Pour le 7ème Bâtiment, les mêmes éléments structuraux ont été testés. Ainsi, le tableau de résultats est composé des éléments suivants : éléments structuraux, âge du béton, section, valeurs moyennes de rebondissement, les résistances à la compression et les résistance moyennes.

Les éléments structuraux testés varient de 6 à 9, l'âge du béton varie de 45 jours à 70 jours, les sections sont 20*30cm pour les poteaux et 20*30cm pour les poutres et 15 cm d'épaisseur pour les dalles, les valeurs moyennes de rebondissement varient de 20 à 25, les résistances mesurées varient de 20 à 31 MPa et les résistances mécanique moyennes varient de 21 à 25.50MPa.

Tableau 3.8 – Résultats des valeurs de résistance en compression du béton sur les éléments structuraux du chantier No8.

Chantier 8	élément	âge [*en jour*]	Section [*cm*]	Rebond moyen [R_m]	f_c mesurée [*MPa*]	f_{cm} moyenne [*MPa*]
VIII.1 Poteau	P1	115	20*20	20	18	19.11
	P2	115	20*20	20	18	
	P3	115	20*20	21	20	
	P4	115	20*20	21	20	
	P5	110	20*20	22	21	
	P6	110	20*20	21	20	
	P7	110	20*20	20	18	
	P8	95	20*20	21	20	
	P9	95	20*20	18	17	
VIII.2 poutre	B1	57	20*30	25	25	21.66
	B2	57	20*30	23	23	
	B3	57	20*30	22	21	
	B4	57	20*30	20	18	
	B5	57	20*30	21	20	
	B6	57	20*30	23	23	
VIII.3 Dalle	D1	57	15	17	21	23.83
	D2	57	15	18	22	
	D3	57	15	23	28	
	D4	57	15	17	21	
	D5	57	15	21	25	
	D6	57	15	22	26	

Pour le 8ème Bâtiment, trois types d'ouvrages ont été testés notamment les poteaux, les poutres et les dalles. Ainsi, le tableau de résultats est composé des éléments suivants : éléments structuraux, âge du béton, section, valeurs moyennes de rebondissement, les résistances à la compression et les résistance moyennes.

En effet, pour les trois cas, les éléments structuraux testés varient de 6 à 9, l'âge du béton varie de 57 jours à 115 jours, les sections sont 20*20 cm pour les poteaux et 20*30cm pour les poutres et 15 cm d'épaisseur pour les dalles, les valeurs moyennes de rebondissement varient de 17 à 25, les résistances mesurées varient de 18 à 28 MPa et les résistances mécanique moyennes varient de 19.11 à 23.83MPa.

Tableau 3.9 – Résultats des valeurs de résistance en compression du béton sur les éléments structuraux du chantier No9.

Chantier 9	élément	âge [$en\ jour$]	Section[cm]	Rebond moyen [R_m]	f_c mesurée [MPa]	f_{cm} moyenne [MPa]
IX.1 Poteau	P1	62	20*20	22	21	20
	P2	62	20*20	20	18	
	P3	62	20*20	20	18	
	P4	62	20*20	22	21	
	P5	65	20*20	23	22	
	P6	65	20*20	21	20	
IX.2 poutre	B1	42	20*30	20	18	16.43
	B2	42	20*30	17	17	
	B3	42	20*30	15	17	
	B4	42	20*30	20	18	
	B5	42	20*30	18	16	
	B6	42	20*30	16	15	
	B7	42	20*31	15	14	
IX.3 Dalle	D1	42	15	19	23	21
	D2	42	15	18	22	
	D3	42	15	16	19	
	D4	42	15	20	22	
	D5	42	15	17	21	
	D6	42	15	16	19	

Pour le 9ème Bâtiment, trois types d'ouvrages ont été testés tels que les poteaux, les poutres et les dalles. Ainsi, le tableau de résultats est composé des éléments suivants : éléments structuraux, âge du béton, section, valeurs moyennes de rebondissement, les résistances à la compression et les résistance moyennes.

Pour les trois cas, les éléments structuraux testés varient de 6 à 7, l'âge du béton varie de 42 jours à 65 jours, les sections sont 20*20 cm pour les poteaux et 20*30cm pour les poutres et 15 cm d'épaisseur pour les dalles, les caractéristiques mécaniques varient de 17 à 20MPa.

Tableau 3.10 – Résultats des valeurs de résistance en compression du béton sur les éléments structuraux du chantier No10.

Chantier 10	élément	âge [*en jour*]	Section[*cm*]	Rebond moyen [R_m]	f_c mesurée [*MPa*]	f_{cm} moyenne [*MPa*]
X.1 Poteau	P1	105	20*20	21	20	20.66
	P2	105	20*20	20	18	
	P3	105	20*20	24	24	
	P4	105	20*20	23	23	
	P5	105	20*20	20	18	
	P6	105	20*20	22	21	
X.2 poutre	B1	70	20*30	21	20	22
	B2	70	20*30	20	18	
	B3	70	20*30	18	27	
	B4	70	20*30	23	32	
	B5	70	20*30	20	18	
	B6	70	20*30	17	17	
X.3 Dalle	D1	70	15	22	26	23.33
	D2	70	15	19	23	
	D3	70	15	18	22	
	D4	70	15	19	23	
	D5	70	15	18	22	
	D6	70	15	20	24	

Pour le 10ème Bâtiment, trois types d'ouvrages ont été testés notamment les poteaux, les poutres et les dalles. Ainsi, le tableau de résultats est composé des éléments suivants : éléments structuraux, âge du béton, section, valeurs moyennes de rebondissement, les résistances à la compression et les résistance moyennes.

Pour chaque cas, six éléments structuraux ont été testés, l'âge du béton varie de 70 jours à 105 jours, les sections sont 20*20 cm pour les poteaux et 20*30cm pour les poutres et 15 cm d'épaisseur pour les dalles, les caractéristiques mécaniques mesurées varient de 18 à 32MPa et moyennes varient de 20.66 à 23.33 MPa.

Tableau 3.11 – Résultats des valeurs de résistance en compression du béton sur les éléments structuraux du chantier No11.

Chantier 11	élément	âge [*en jour*]	Section [*cm*]	Rebond moyen [R_m]	f_c *mesurée* [*MPa*]	f_c moyenne [*MPa*]
XI.1 Poteau	P1	90	20*30	11	10	15.55
	P2	90	20*30	16	15	
	P3	90	20*30	12	12	
	P4	93	20*30	22	21	
	P5	93	20*30	14	13	
	P6	93	20*30	18	17	
	P7	102	20*30	20	19	
	P8	102	20*30	19	18	
	P9	102	20*30	16	15	
XI.2 poutre	B1	55	20*30	25	25	19.83
	B2	55	20*30	24	23	
	B3	55	20*30	16	15	
	B4	55	20*30	24	23	
	B5	55	20*30	20	18	
	B6	55	20*30	16	15	
XI.3 Dalle	D1	55	15	21	25	20
	D2	55	15	21	18	
	D3	55	15	15	23	
	D4	55	15	19	17	
	D5	55	15	14	19	
	D6	55	15	16	21	
	D7	55	15	17	17	

Pour le 11ème Bâtiment, trois types d'ouvrages ont été testés notamment les poteaux, les poutres et les dalles. Ainsi, le tableau de résultats est composé des éléments suivants : éléments structuraux, âge du béton, section, valeurs moyennes de rebondissement, les résistances à la compression et les résistance moyennes.

En effet, pour les trois cas, les éléments structuraux testés varient de 6 à 9, l'âge du béton varie de 55 jours à 102 jours, les sections sont 20*20 cm pour les poteaux et 20*30cm pour les poutres et 15 cm d'épaisseur pour les dalles, les caractéristiques mécaniques mesurées varient de 10 à 21 MPa et moyennes varient de 15.55 à 20 MPa.

Tableau 3.12 – Résultats des valeurs de résistance en compression du béton sur les éléments structuraux du chantier No12.

Chantier 12	élément	âge [en jour]	Section[cm]	Rebond moyen [R_m]	f_c mesurée [MPa]	f_{cm} moyenne [MPa]
XII.1 Poteau	P1	55	20*20	21	20	21.22
	P2	55	20*20	22	21	
	P3	55	20*20	20	18	
	P4	58	20*20	21	20	
	P5	58	20*20	23	23	
	P6	58	20*20	20	18	
	P7	60	20*20	24	24	
	P8	60	20*20	22	21	
	P9	60	20*20	25	26	
XII.2 poutre	B1	33	20*30	21	20	21.83
	B2	33	20*30	21	20	
	B3	33	20*30	20	19	
	B4	33	20*30	25	26	
	B5	33	20*30	24	23	
	B6	33	20*31	23	23	
XII.3 Dalle	D1	33	15	21	25	20
	D2	33	15	15	18	
	D3	33	15	19	23	
	D4	33	15	14	17	
	D5	33	15	16	19	
	D6	33	15	17	21	
	D7	33	15	14	17	

Pour le 12ème chantier, trois types d'ouvrages ont été testés notamment les poteaux, les poutres et les dalles. Ainsi, le tableau de résultats est composé les mêmes éléments.

En effet, pour les trois cas, les éléments structuraux testés varient de 6 à 9, l'âge du béton varie de 33 jours à 60 jours, les sections sont 20*20 cm pour les poteaux et 20*30cm pour les poutres et 15 cm d'épaisseur pour les dalles, les caractéristiques mécaniques mesurées varient de 18 à 26 MPa et moyennes varient de 20 à 21.83 MPa.

Tableau 3.13 – Résultats des valeurs de résistance en compression du béton sur les éléments structuraux du chantier No13.

Chantier 13	élément	âge [$en\ jour$]	Section[cm]	Rebond moyen [R_m]	f_c mesurée [MPa]	f_{cm} moyenne [MPa]
XIII.1 Poteau	P1	75	20*20	13	12	14
	P2	75	20*20	13	13	
	P3	75	20*20	13	12	
	P4	80	20*20	16	15	
	P5	80	20*20	15	14	
	P6	80	20*20	14	13	
	P7	90	20*20	19	18	
	P8	90	20*20	17	16	
	P9	90	20*20	20	18	
XIII.2 poutre	B1	35	20*30	21	20	19
	B2	35	20*30	19	18	
	B3	35	20*30	18	17	
	B4	35	20*30	24	23	
	B5	35	20*30	20	18	
	B6	35	20*30	19	18	
XIII.3 Dalle	D1	35	15	20	24	23
	D2	35	15	18	22	
	D3	35	15	18	22	
	D4	35	15	21	25	
	D5	35	15	20	24	
	D6	35	15	19	23	

Pour le 13ème chantier, trois types d'ouvrages ont été testés tels que les poteaux, les poutres et les dalles. En effet, pour les trois cas, les éléments structuraux testés varient de 6 à 9, l'âge du béton varie de 35 jours à 90 jours, les sections sont 20*20 cm pour les poteaux et 20*30cm pour les poutres et 15 cm d'épaisseur pour les dalles, les caractéristiques mécaniques mesurées varient de 12 à 25 MPa et moyennes varient de 14 à 23MPa.

Tableau 3.14 – Résultats des valeurs de résistance en compression du béton sur les éléments structuraux du chantier No14.

Chantier 14	élément	âge [*en jour*]	Section[*cm*]	Rebond moyen [R_m]	f_c mesurée [*MPa*]	f_{cm} moyenne [*MPa*]
XIV.1 Poteau	P1	75	20*20	20	18	18
	P2	75	20*20	16	15	
	P3	75	20*20	19	17	
	P4	75	20*20	22	22	
	P5	75	20*20	21	20	
	P6	75	20*20	18	16	
XIV.2 poutre	B1	35	20*30	25	31	28.5
	B2	35	20*30	18	22	
	B3	35	20*30	24	28	
	B4	35	20*30	24	28	
	B5	35	20*30	25	31	
	B6	35	20*30	25	31	
XIV.3 Dalle	D1	35	15	23	28	28
	D2	35	15	24	30	
	D3	35	15	27	34	
	D4	35	15	20	22	
	D5	35	15	28	36	
	D6	35	15	20	18	

Pour le 14ème chantier, nous avons suivi les mêmes procédures que les bâtiments précédents.

En effet, pour les trois cas, six éléments structuraux ont été testés, l'âge du béton varie de 35 jours à 75 jours, les sections sont 20*20 cm pour les poteaux et 20*30cm pour les poutres et 15 cm d'épaisseur pour les dalles, les caractéristiques mécaniques mesurées varient de 15 à 34 MPa et les valeurs moyennes varient de 18 à 28.50 MPa.

Tableau 3.15 – Résultats des valeurs de résistance en compression du béton sur les éléments structuraux du chantier No15.

Chantier 15	Elément	âge [*en jour*]	Section[*cm*]	Rebond moyen [R_m]	f_c mesurée [*MPa*]	f_{cm} moyenne [*MPa*]
XV.1 Poteau	P1	75	20*20	20	19	19.19
	P2	75	20*20	22	21	
	P3	75	20*20	18	17	
	P4	75	20*20	19	18	
	P5	75	20*20	19	18	
	P6	75	20*20	17	16	
XV.2	B1	40	20*30	23	24	26.83
	B2	40	20*30	23	24	
	B3	40	20*30	28	30	
	B4	40	20*30	24	25	
	B5	40	20*30	27	28	
	B6	40	20*30	20	30	
XV.3 Dalle	D1	40	15	22	26	24.33
	D2	40	15	23	28	
	D3	40	15	19	18	
	D4	40	15	21	25	
	D5	40	15	20	24	
	D6	40	15	21	25	

Pour le 15ème chantier, trois types d'ouvrages ont été testés notamment les poteaux, les poutres et les dalles. Ainsi, le tableau de résultats est composé des éléments suivants : éléments structuraux, âge du béton, section, valeurs moyennes de rebondissement, les résistances à la compression et les résistance moyennes.

En effet, pour les trois cas, six éléments structuraux ont été testés, l'âge du béton varie de 40 jours à 75 jours, les sections sont 20*20 cm pour les poteaux et 20*30cm pour les poutres et 15 cm d'épaisseur pour les dalles, les caractéristiques mécaniques mesurées varient de 16 à 30 MPa et moyennes varient de 19.19 à 24.33 MPa.

Tableau 3.16 – Résultats des valeurs de résistance en compression du béton sur les éléments structuraux du chantier No16.

Chantier 16	élément	âge [*en jour*]	Section[*cm*]	Rebond moyen [R_m]	f_c mesurée [*MPa*]	f_{cm} moyenne [*MPa*]
XVI.1 Poteau	P1	95	20*20	19	18	17.33
	P2	95	20*20	18	17	
	P3	95	20*20	19	18	
	P4	95	20*20	17	16	
	P5	95	20*20	19	18	
	P6	95	20*20	18	17	
XVI.2	B1	60	20*30	21	21	23.83
	B2	60	20*30	26	28	
	B3	60	20*30	26	28	
	B4	60	20*30	25	26	
	B5	60	20*30	20	20	
	B6	60	20*30	20	20	
XVI.3 Dalle	D1	60	15	20	24	26.4
	D2	60	15	24	30	
	D3	60	15	23	28	
	D4	60	15	21	25	
	D5	60	15	21	25	
	D6	60	15	21	26	

Pour le 16ème chantier, trois types d'ouvrages ont été testés notamment les poteaux, les poutres et les dalles. Ainsi, le tableau de résultats est composé des éléments suivants : éléments structuraux, âge du béton, section, valeurs moyennes de rebondissement, les résistances à la compression et les résistance moyennes.

En effet, pour les trois cas, six éléments structuraux ont été testés, l'âge du béton varie de 60 jours à 95 jours, les sections sont 20*20 cm pour les poteaux et 20*30cm pour les poutres et 15 cm d'épaisseur pour les dalles, les caractéristiques mécaniques mesurées varient de 16 à 30 MPa et moyennes varient de 17.33 à 26.83 MPa.

Tableau 3.17 – Résultats des valeurs de résistance en compression du béton sur les éléments structuraux du chantier No17.

Chantier 17	élément	âge [$en\ jour$]	Section[cm]	Rebond moyen [R_m]	f_c mesurée [MPa]	f_{cm} moyenne [MPa]
XVII.1 Poteau	P1	105	20*20	21	20	18.33
	P2	105	20*20	18	17	
	P3	105	20*20	18	17	
	P4	105	20*20	19	18	
	P5	105	20*20	21	20	
	P6	105	20*21	19	18	
XVII.2 poutre	P7	105	20*22	18	17	17.83
	B1	55	20*30	18	17	
	B2	55	20*30	20	19	
	B3	55	20*30	21	20	
	B4	55	20*30	18	17	
	B5	55	20*30	18	17	
	B6	55	20*30	26	17	
XVII.3 Dalle	D1	55	15	21	24	22.38
	D2	55	15	19	18	
	D3	55	15	21	24	
	D4	55	15	21	24	
	D5	55	15	20	24	
	D6	55	15	18	17	
	D7	55	15	20	24	
	D8	55	15	20	24	

Pour la 17ème campagne, trois types d'ouvrages ont été testés notamment les poteaux, les poutres et les dalles. Ainsi, le tableau de résultats est composé des éléments suivants : éléments structuraux, âge du béton, section, valeurs moyennes de rebondissement, les résistances à la compression et les résistance moyennes.

En effet, pour les trois cas, les éléments structuraux testés varient de 6 à 7, l'âge du béton varie de 55 jours à 105 jours, les sections sont 20*20 cm pour les poteaux et 20*30cm pour les poutres et 15 cm d'épaisseur pour les dalles, les caractéristiques mécaniques mesurées varient de 17 à 24 MPa et moyennes varient de 17.83 à 22.38 MPa.

3.7. Analyse et discussion des résultats

Pour l'analyse des résultats présentés dans les tableaux précédents, des diagrammes sous formes des histogrammes sont établis.

Pour le premier bâtiment d'étude désigné ici chantier 1, le ciment utilisé était de classe de résistance (42.5). Les résultats obtenus (Figure 3.5) montrent que les valeurs de résistance en compression mesurées pour les poteaux sont plus élevées par rapport à celles mesurées pour les poutres et dalles. 86% des poteaux ont une résistance en compression supérieure à la valeur (normative) de référence. 71% des résistances en compression du béton, mesurées sur les poutres et les panneaux de la dalle étaient inférieures à la valeur normative de résistance en compression du béton issue du ciment de classe (42.5), marquée par la ligne pointillée.

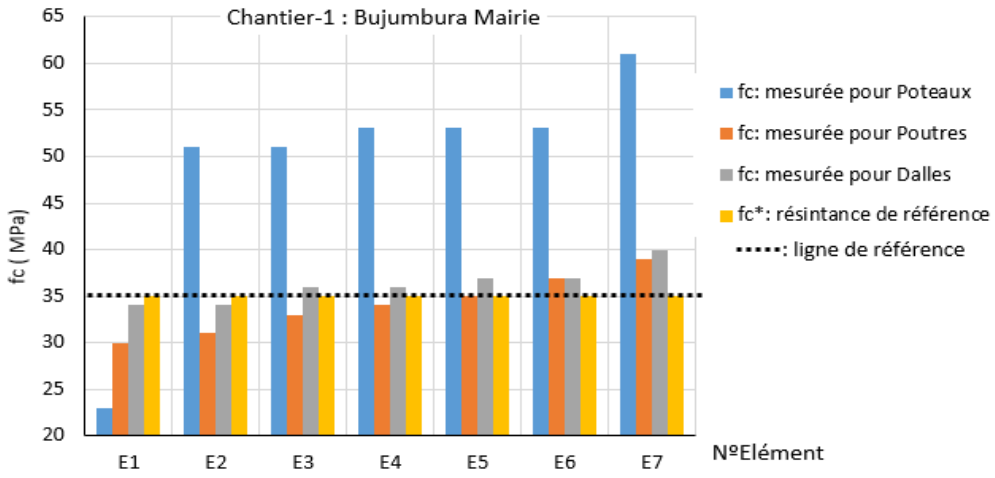


Figure 3.5 – Résistances à la compression mesurées sur les éléments structuraux du bâtiment d'étude numéro (1) en Mairie de Bujumbura.

Pour le deuxième bâtiment d'étude désigné ici chantier 2, le ciment utilisé était aussi de classe de résistance (42.5). Les résultats obtenus (Figure 3.6) montrent que les valeurs de résistance en compression mesurées pour les poteaux sont plus élevées par rapport à celles mesurées pour les poutres et dalles. 100% des poteaux avaient une résistance en compression supérieure à la valeur (normative) de référence. 90% des résistances en compression du béton, mesurées sur les poutres et les panneaux de la dalle étaient inférieures à la valeur normative de résistance en compression du béton issue du ciment de classe (42.5), marquée par la ligne pointillée.

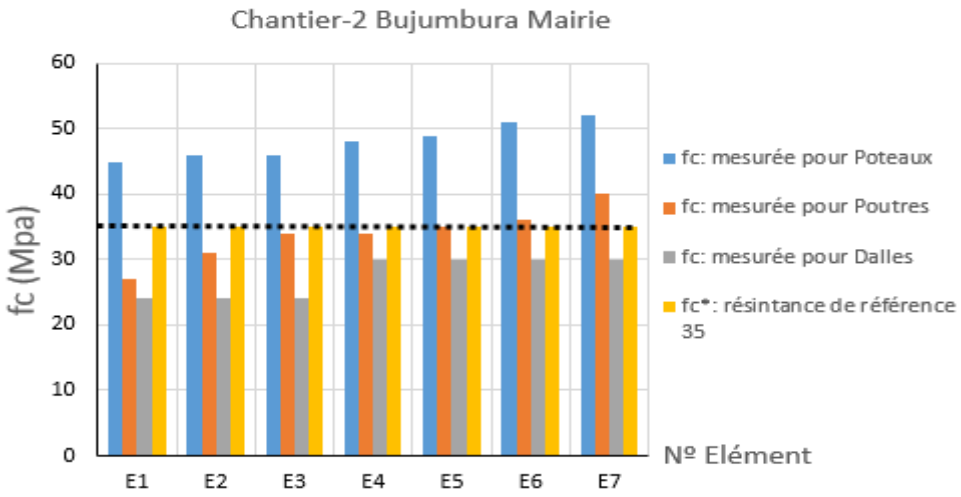


Figure 3.6 – Résistances à la compression mesurées sur les éléments structuraux du bâtiment d'étude numéro (2) en Mairie de Bujumbura.

Pour le 3ème chantier, 86% des résistances en compression du béton sont inférieures à la valeur normative de résistance en compression du béton (Figure 3.7)

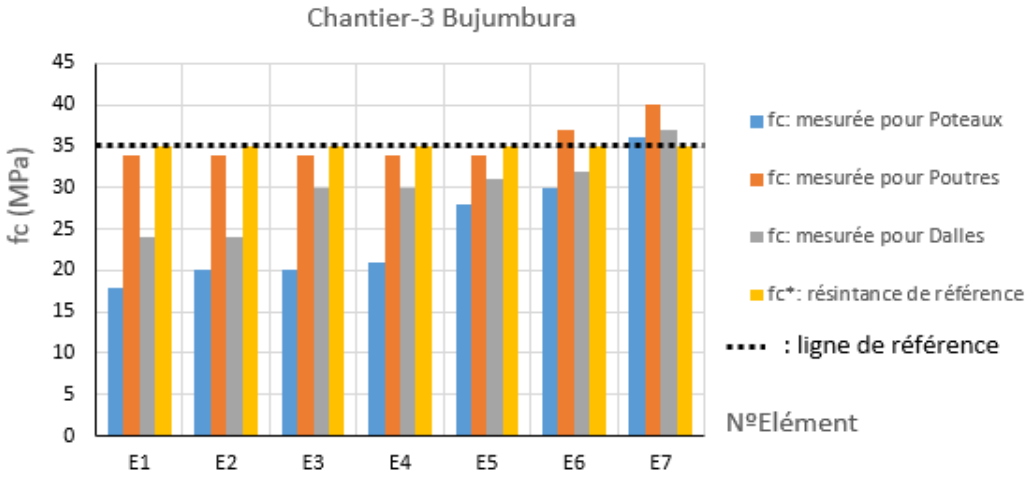


Figure 3.7 – Résistances à la compression mesurées sur les éléments structuraux du bâtiment d'étude numéro (3) en province de Bujumbura.

Pour le 4eme chantier, 100% des résistances en compression du béton mesurées sur les poteaux, poutres et dalles sont supérieures à la valeur normative de résistance en compression du béton (Figure 3.8).

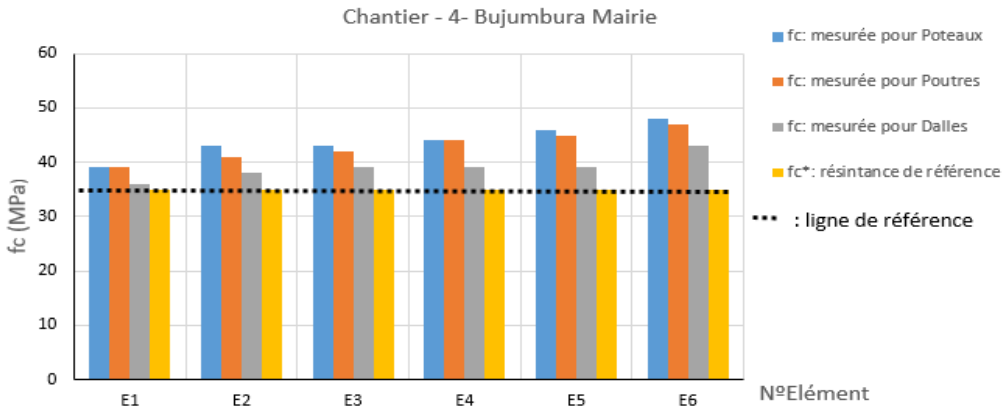


Figure 3.8 – Résistances à la compression mesurées sur les éléments structuraux du bâtiment d'étude numéro (4) en Mairie de Bujumbura.

D'après les résultats obtenus, pour le 5eme chantier, nous constatons que les résistances à la compression du béton des poutres sont à 86% supérieures à la résistance de référence. 100% des poteaux et panneaux de dalle ont une résistance inférieure à la valeur de référence de la résistance en compression du béton (Figure 3.9).

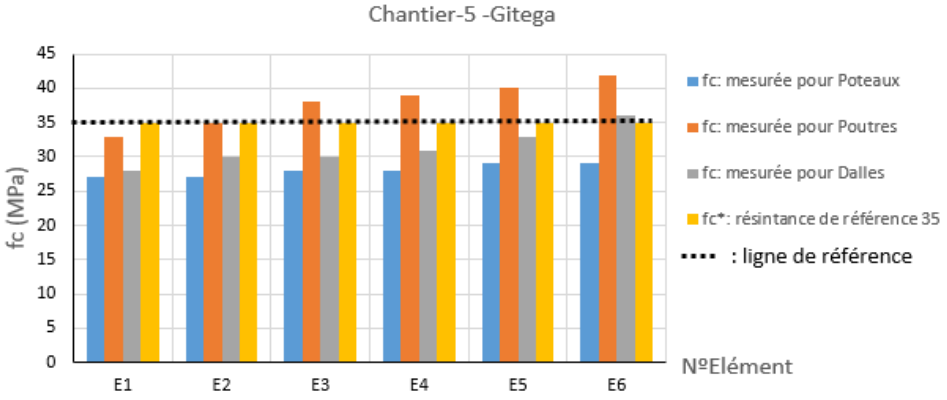


Figure 3.9 – Résistances à la compression mesurées sur les éléments structuraux du bâtiment d'étude numéro (5) à Gitega.

Pour le 6eme chantier, 100% des poteaux ont une résistance en compression supérieure à la résistance de référence. Et 86% des poutres et panneaux de dalle ont une résistance supérieure à la valeur de référence de la résistance en compression du béton (Figure 3.10).

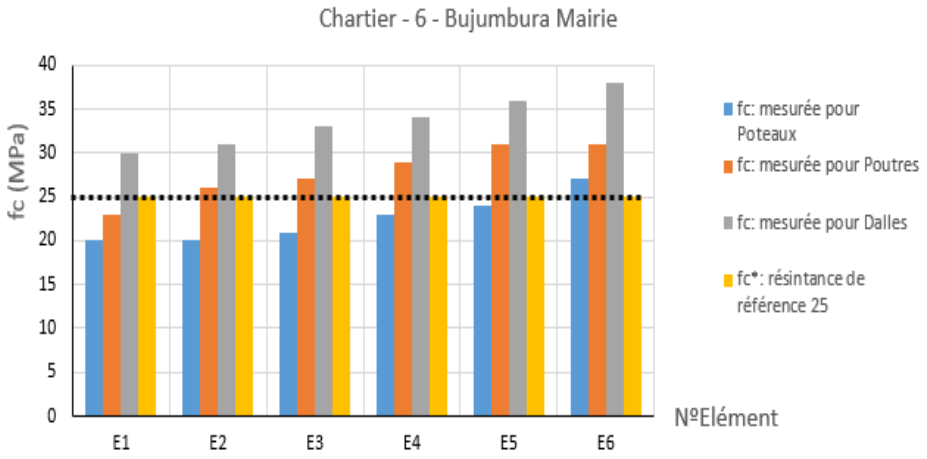


Figure 3.10 – Résistances à la compression mesurées sur les éléments structuraux du bâtiment d'étude numéro (6) en Mairie de Bujumbura.

Pour le 7eme chantier, 86% des poteaux et poutres ont une résistance en compression supérieure à la résistance de référence. Et 100% des résistances mesurées sur les panneaux de la dalle ont une résistance inférieure à la valeur de référence de la résistance en compression du béton (Figure 3.11).

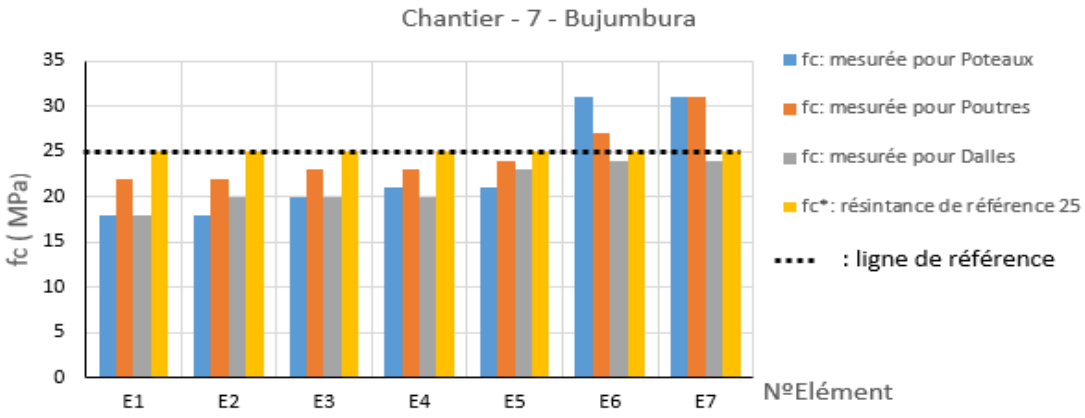


Figure 3.11 – Résistances à la compression mesurées sur les éléments structuraux du bâtiment d'étude numéro (7) dans la province de Bujumbura.

Pour le 8eme chantier, 86% des résistances mesurées en compression ont une valeur inférieure à la valeur de référence (Figure 3.12).

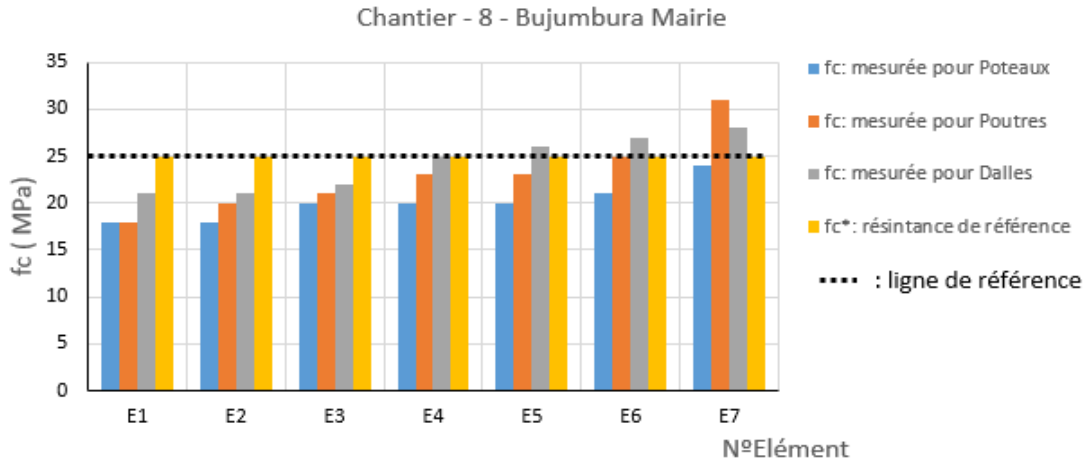


Figure 3.12 – Résistances à la compression mesurées sur les éléments structuraux du bâtiment d'étude numéro (8) en Mairie de Bujumbura.

Les résultats obtenus sur le 9eme chantier montrent que 100% des résistances mesurées en compression du béton sont inférieures à la valeur de référence (Figure 3.13).

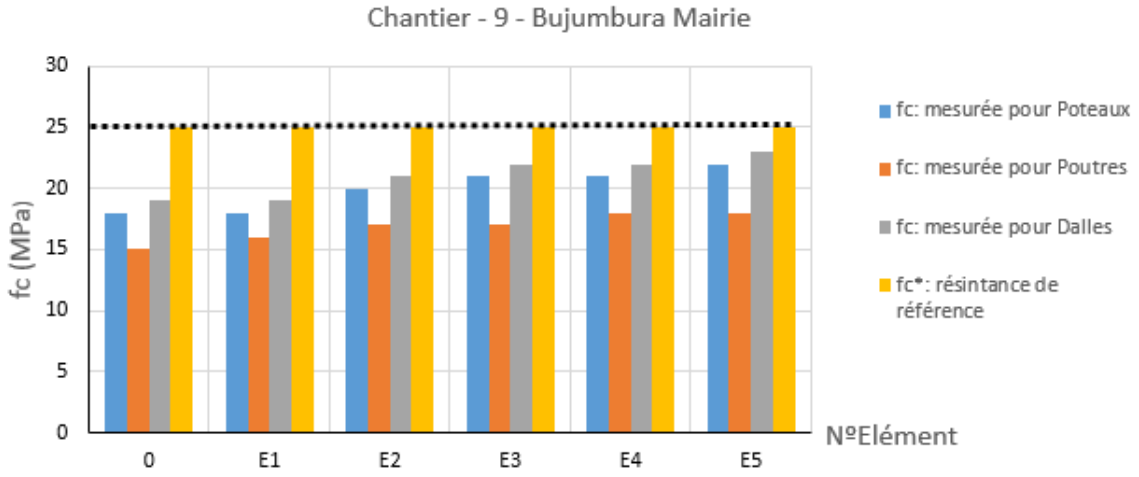


Figure 3.13 – Résistances à la compression mesurées sur les éléments structuraux du bâtiment d'étude numéro (9) en Mairie de Bujumbura.

Au 10eme chantier, 67% des poutres ont une résistance en compression inférieures à la résistance de référence. Et 100% des poteaux et panneaux de dalles ont une résistance en compression inférieure à la valeur de référence donnée par les normes du béton (Figure 3.14).

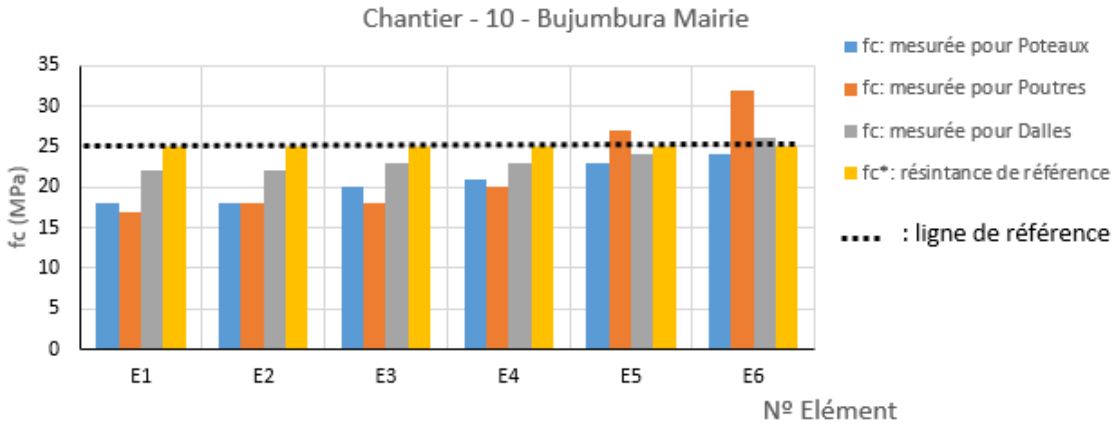


Figure 3.14 – Résistances à la compression mesurées sur les éléments structuraux du bâtiment d'étude numéro (10) en Mairie de Bujumbura.

Pour le 11eme chantier étudié, 100% des éléments structuraux ont des résistances en compression inférieure à la valeur de résistance de référence en compression du béton (Figure 3.15).

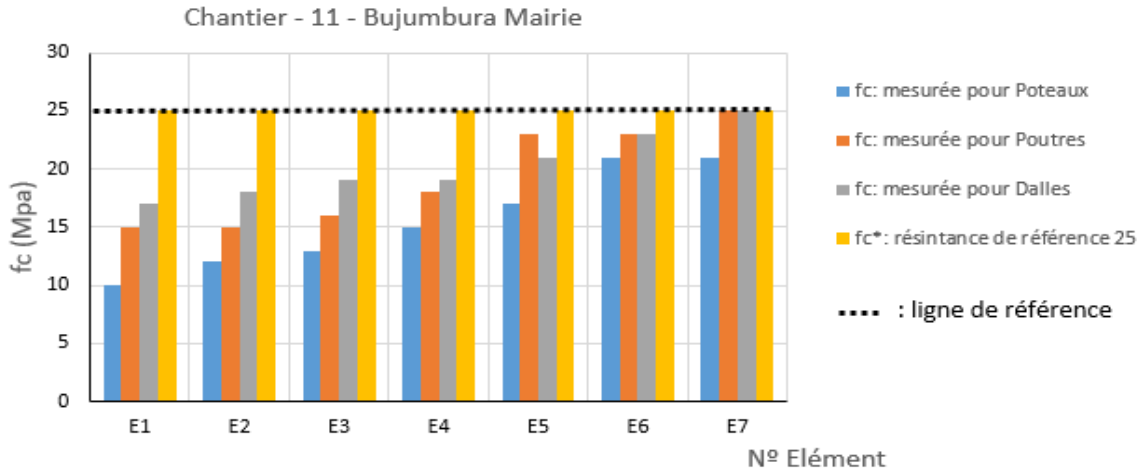


Figure 3.15 – Résistances à la compression mesurées sur les éléments structuraux du bâtiment d'étude numéro (11) en Mairie de Bujumbura.

Pour le 12eme chantier, presque (100%) tous les éléments structuraux ont une résistance en compression du béton inferieure à la valeur normative de résistance en compression (Figure 3.16).

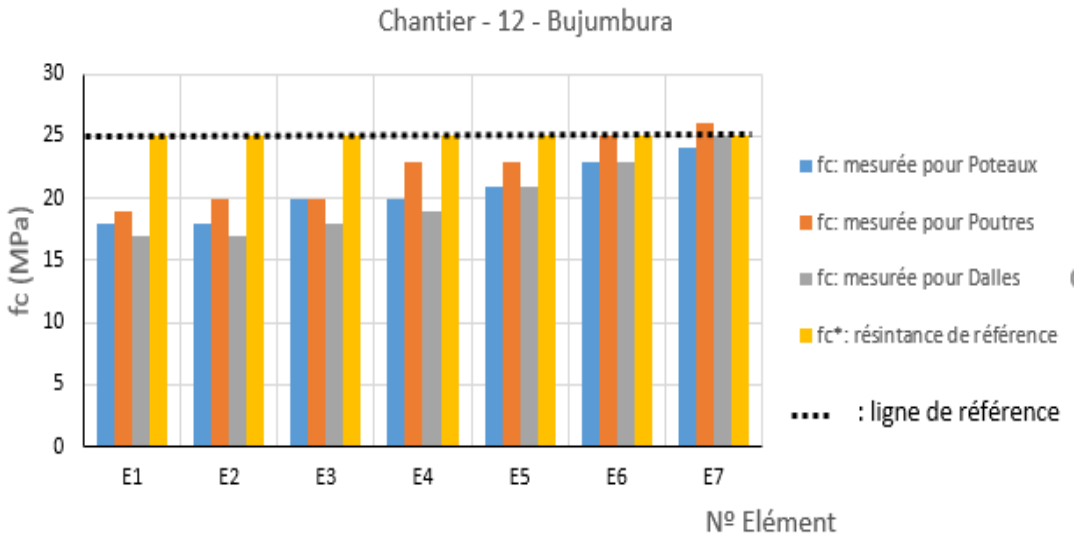


Figure 3.16 – Résistances à la compression mesurées sur les éléments structuraux du bâtiment d'étude numéro (12) dans la province de Bujumbura.

Pour le 13eme chantier, 100% des éléments structuraux ont une résistance en compression du béton inferieure à la valeur normative (Figure 3.17).

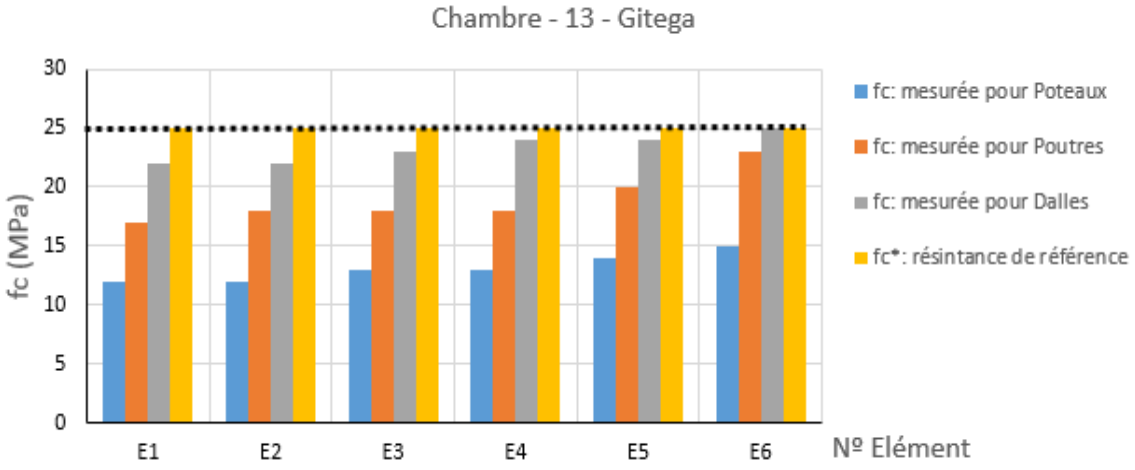


Figure 3.17 – Résistances à la compression mesurées sur les éléments structuraux du bâtiment d'étude numéro (13) dans la province de Gitega.

Pour le 14eme chantier, 100% des poteaux ont une résistance en compression du béton inférieure à la valeur normative. Aussi 33% des poutres et panneau de dalle ont une résistance en compression du béton inférieure à la valeur normative (Figure 3.18).

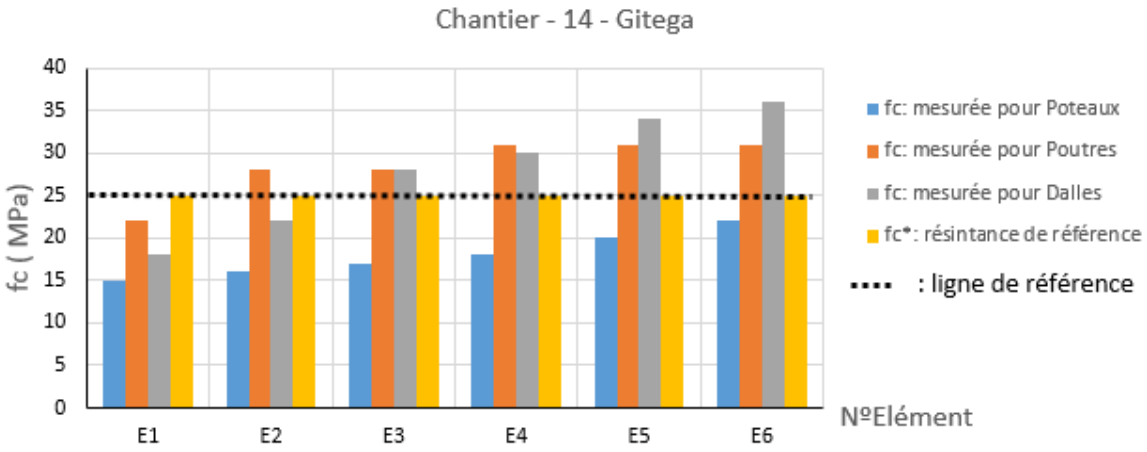


Figure 3.18 – Résistances à la compression mesurées sur les éléments structuraux du bâtiment d'étude numéro (14) dans la province de Bujumbura.

Pour le 15eme chantier, 100% des poteaux testés ont une résistance en compression du béton inferieure à la résistance normative (Figure 3.19).

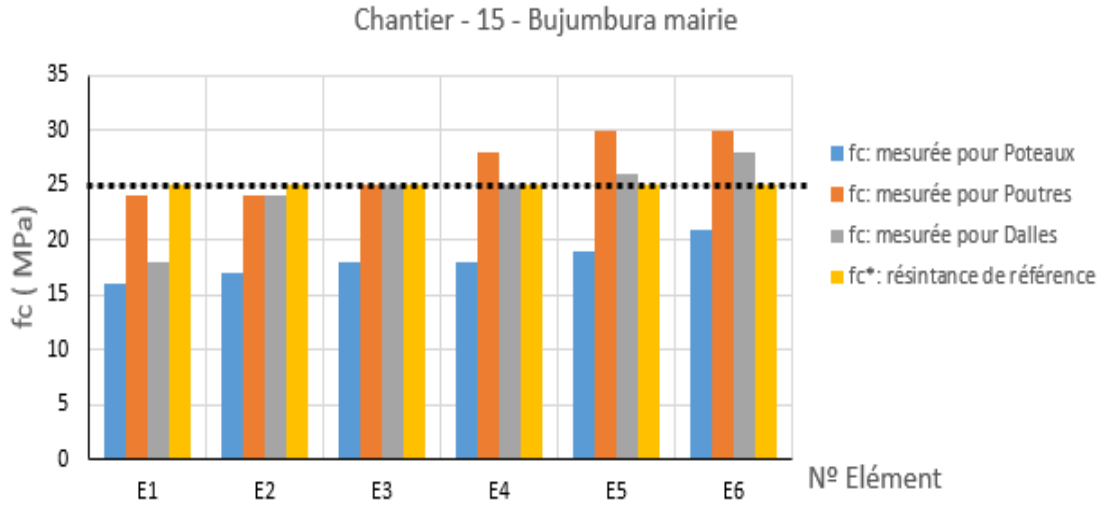


Figure 3.19 – Résistances à la compression mesurées sur les éléments structuraux du bâtiment d'étude numéro (15) en Mairie de Bujumbura.

Sur le 16eme chantier, 100% des poteaux testes ont une résistance en compression inferieure a la résistance normative. Seules 50% des poutres et panneaux de dalles testes ont résistance atteignant la résistance normative en compression du béton pour la classe du ciment utilisée (Figure 3.20).

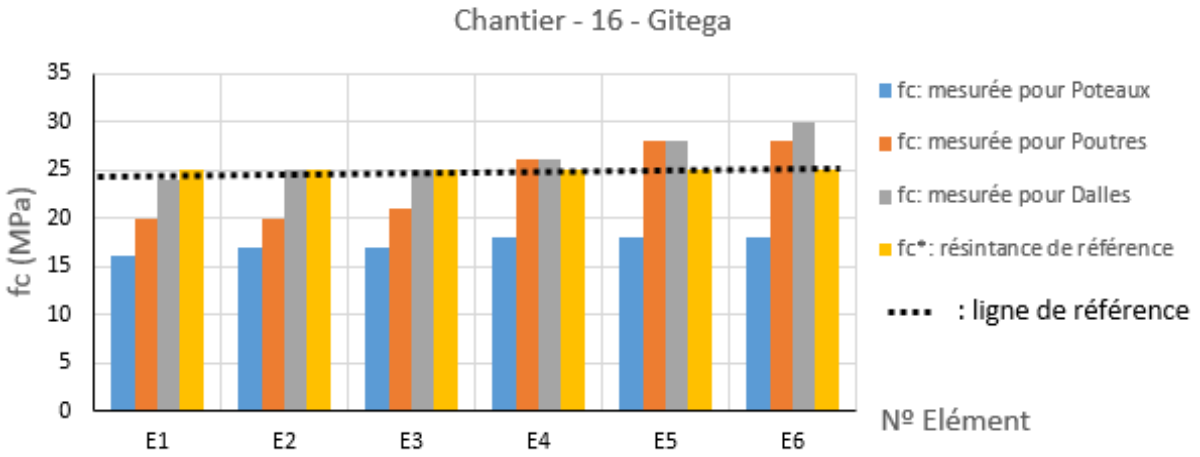


Figure 3.20 – Résistances à la compression mesurées sur les éléments structuraux du bâtiment d'étude numéro (16) dans la province de Gitega.

Pour le dix-septième chantier étudié, 100% des poutres et panneaux de dalles testes ont une résistance en compression du béton inferieure a la valeur normative. Aussi 98% des poteaux ont une résistance en compression du béton inferieure à la résistance normative en compression (Figure 3.21).

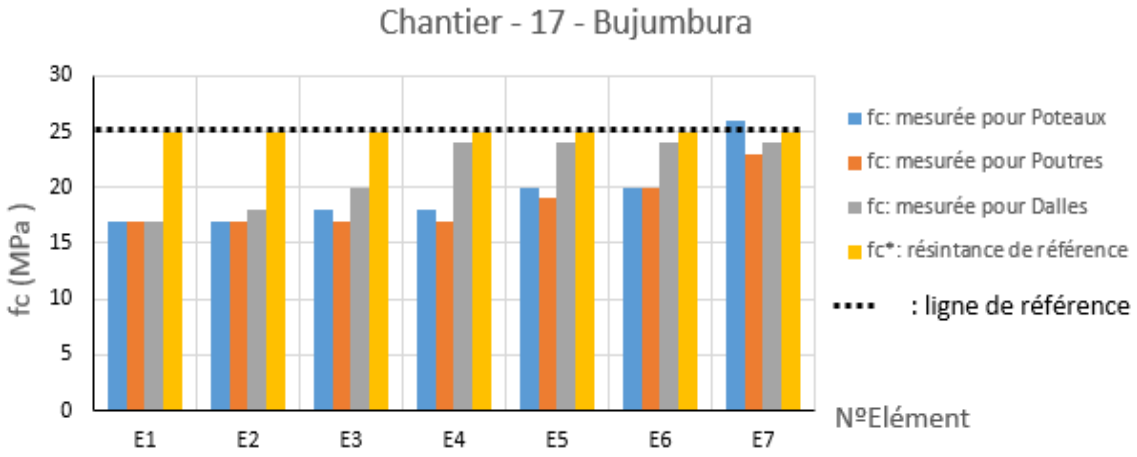


Figure 3.21 – Résistances à la compression mesurées sur les éléments structuraux du bâtiment d'étude numéro (17) dans la province de Bujumbura.

D'une façon globale, les résultats obtenus peuvent être représentés par le diagramme (Figure 3.22) suivant pour les poteaux.

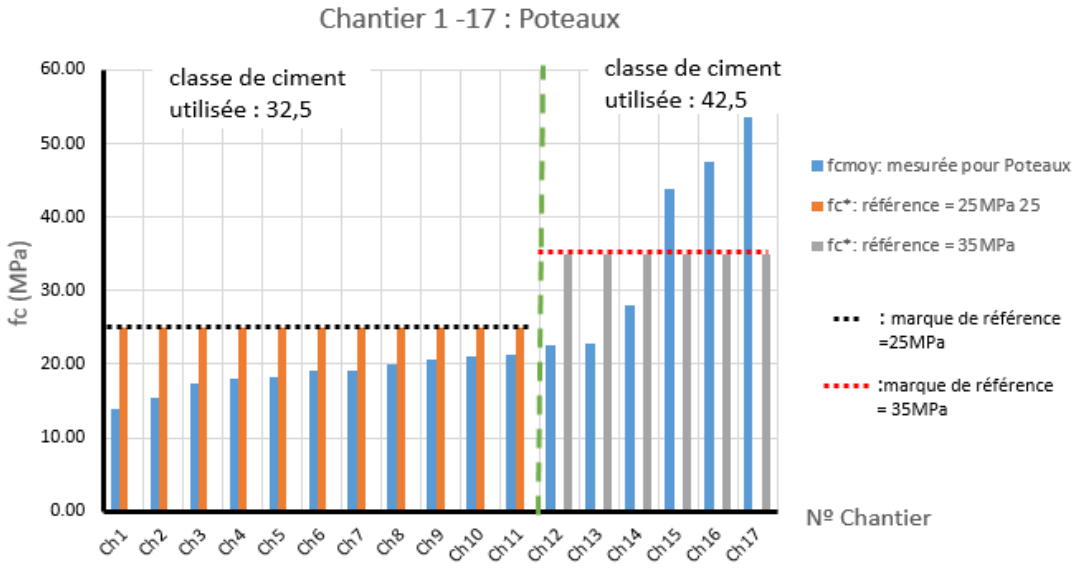


Figure 3.22 – Diagrammes des résultats globaux des résistances en compression du béton des poteaux testés et selon la classe de ciment utilisé pour la fabrication des bétons.

Nous constatons globalement donc que 88% des poteaux testés au cours de cette étude ont des résistances en compression du béton inferieures aux résistances normatives respectivement aux classes des ciments utilisés. Aussi par le diagramme des résultats globaux pour les poutres (Figure 3.23), nous constatons aussi que 82% des poutres testés ont des résistances en compression du béton inferieures aux résistances normatives respectivement aux classes des ciments utilisés.

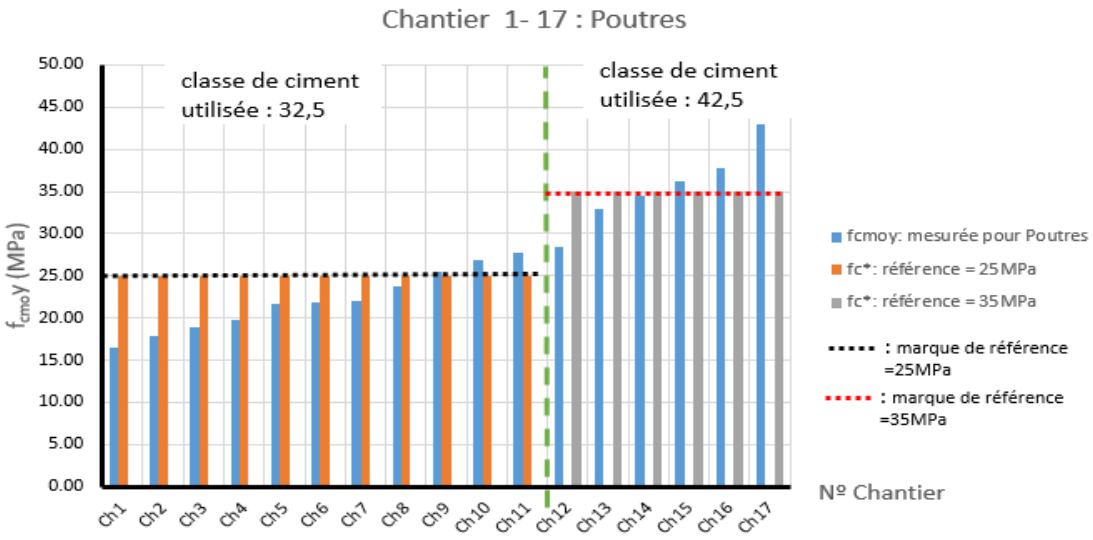


Figure 3.23 – Diagrammes des résultats globaux des résistances en compression du béton des poutres testées et selon la classe de ciment utilisé pour la fabrication des bétons.

Quant aux dalles, nous constatons que plus de 82% des panneaux de dalles testés ont une résistance en compression du béton inferieure a la résistance normative du béton en compression respectivement aux classes de ciment utilises pour la fabrication de ce béton (Figure 3.24).

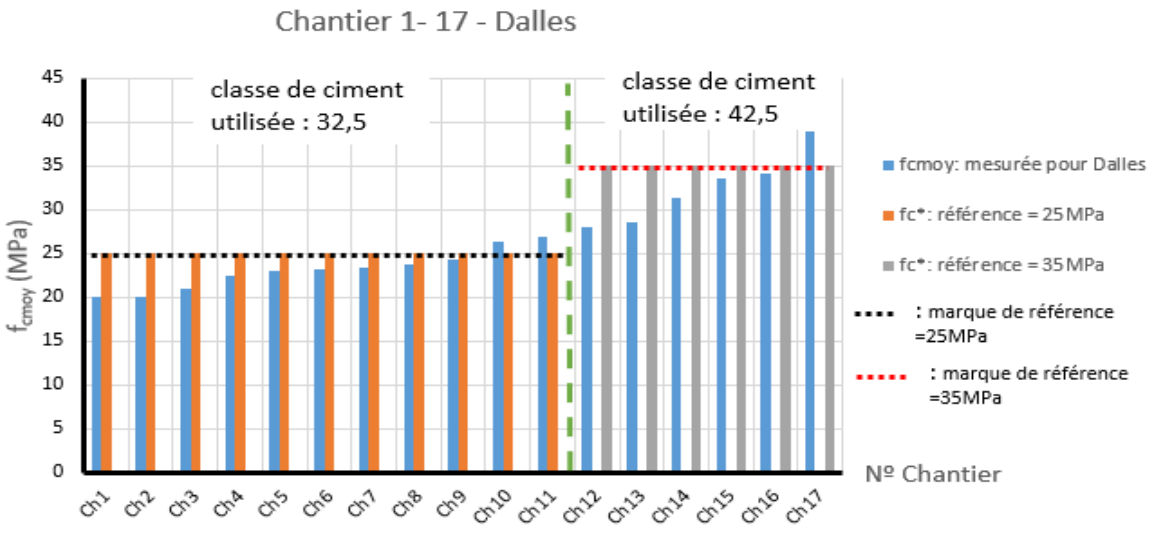


Figure 3.24 – Diagrammes des résultats globaux des résistances en compression du béton des panneaux de dalles testés et selon la classe de ciment utilisé pour la fabrication des bétons.

Finalement, les résultats obtenus et évoqués ci-haut peuvent être facilement interprétés avec le diagramme synthèse (Figure 3.25) suivant :

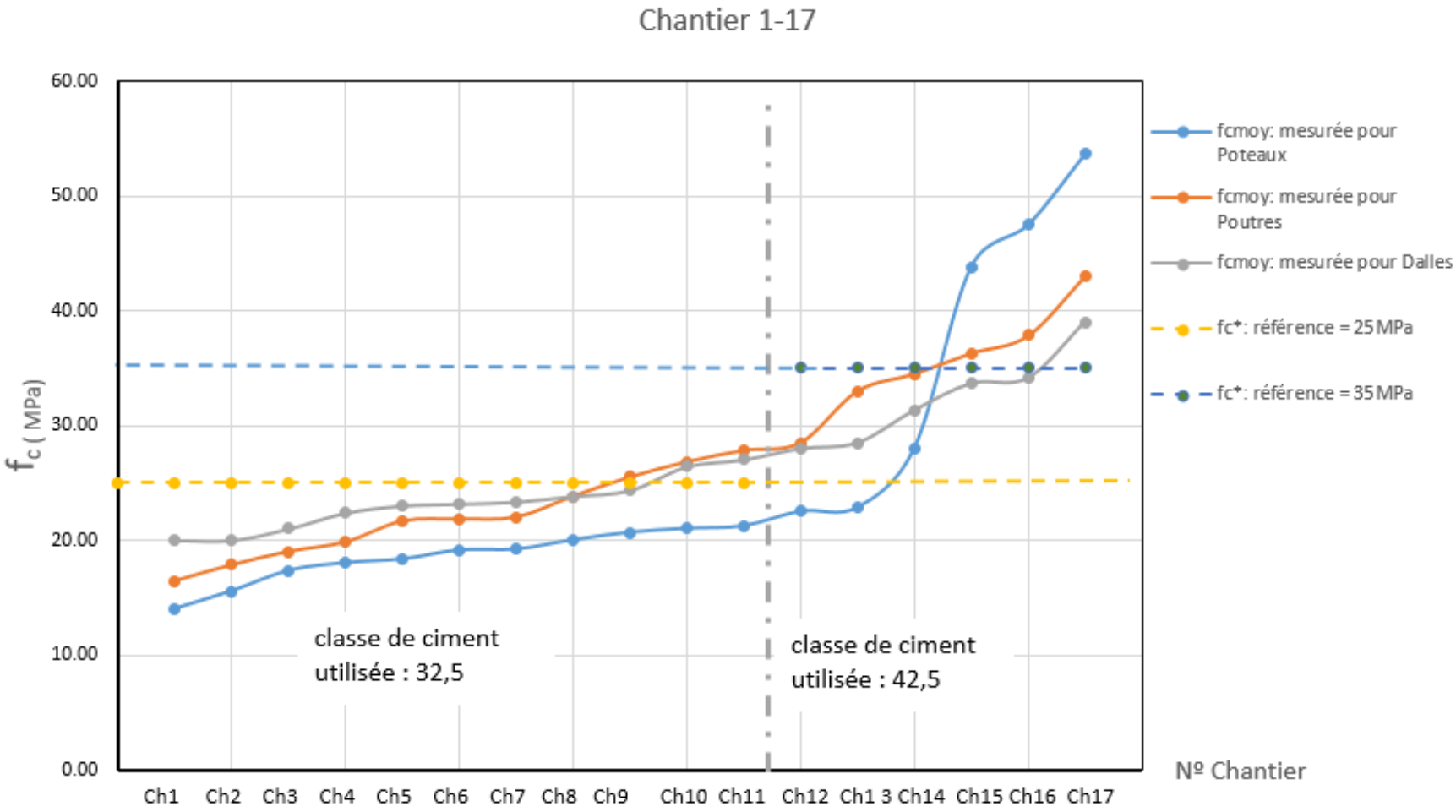


Figure 4.25 – Diagramme-synthèse des valeurs moyennes des résistances en compression du béton des éléments structuraux des 17 bâtiments ayants fait objets d'études.

3.8. Comparaison des résultats obtenus par deux méthodes (mesure au Scléromètre et au presse)

L'interprétation des résultats se fait par une comparaison entre la technique non destructive en occurrence le scléromètre et les valeurs obtenues par des essais mécaniques l'écrasement des éprouvettes. Les résistances à 14 et 28 jours des éprouvettes (10*10*10 cm ou 15*15*15 cm) fabriquées au laboratoire pour un béton dosé à 350 kg/m3.

Les éprouvettes sont nettoyées et soumises à l'essai mécanique ; les résistances à la compression sont corrigées pour valoir celles des cubes 10×10×10 cm pour pouvoir ensuite les associer aux mesures obtenues des essais au scléromètre effectués sur les parois des éléments structuraux des ouvrages.

Les tableaux résumant les résultats obtenus sont ci- dessous :

Tableau 3.18 – Résultats des essais d'écrasement et au scléromètre pour éprouvettes fabriquées au laboratoire.

				fc ecrasement (Mpa)		fc scléromètre (Mpa)	
ciment utilisée	d'éprouvette	section	date de coulage	14 jours	28jours	14 jours	28jours
32.5	B1	10*10*10	16.09.2021	15.46	18.55	12.88	19.95
	B2	10*10*10	16.09.2021	16.25	19.50	13.54	20.97
	B3	10*10*10	16.09.2021	16.70	20.04	13.92	21.55
	B4	10*10*10	16.09.2021	15.05	18.06	12.54	19.42
	B5	10*10*10	16.09.2021	22.06	26.47	18.38	28.46
	B6	10*10*10	16.09.2021	22.15	26.58	18.46	28.58
	B7	10*10*10	16.09.2021	16.13	19.36	13.44	20.81
	B8	10*10*10	16.09.2021	14.46	17.35	12.05	18.66
	B9	15*15*15	16.09.2021	15.56	18.67	12.97	20.08
	B10	15*15*15	16.09.2021	16.70	20.04	13.92	21.55
	B11	15*15*15	16.09.2021	17.25	20.70	14.38	22.26
	B12	15*15*15	16.09.2021	22.77	27.32	18.98	29.38
	B13	15*15*15	16.09.2021	15.95	19.14	13.29	20.58
	B14	15*15*15	16.09.2021	16.43	19.72	13.69	21.20
	B15	15*15*15	16.09.2021	26.55	31.86	22.13	34.26
	B16	15*15*15	16.09.2021	18.36	22.03	15.30	23.69
42.5	B1	10*10*10	17.09.2021	32.50	39.17	27.08	42.12
	B2	10*10*10	17.09.2021	31.13	37.24	25.94	40.04
	B3	10*10*10	17.09.2021	36.25	51.17	30.21	55.02
	B4	15*15*15	17.09.2021	38.60	57.43	32.17	61.75
	B5	15*15*15	17.09.2021	41.42	52.17	34.52	56.10
	B6	15*15*16	17.09.2021	37.12	47.15	30.93	50.70
	B7	15*15*17	17.09.2021	31.50	49.87	26.25	53.62

Pour les deux formulations du béton ainsi que pour les deux âges différents ; les valeurs obtenues après les essais pour l'écrasement à 14 jours sont supérieures aux celles mesurées en utilisant le Scléromètre, par contre à 28 jours les valeurs obtenues par mesures au scléromètre sont supérieures à celles obtenues par écrasement des éprouvettes.

Pour l'analyse des résultats présentés dans le tableau précédent, des diagrammes sous formes des histogrammes sont établis.

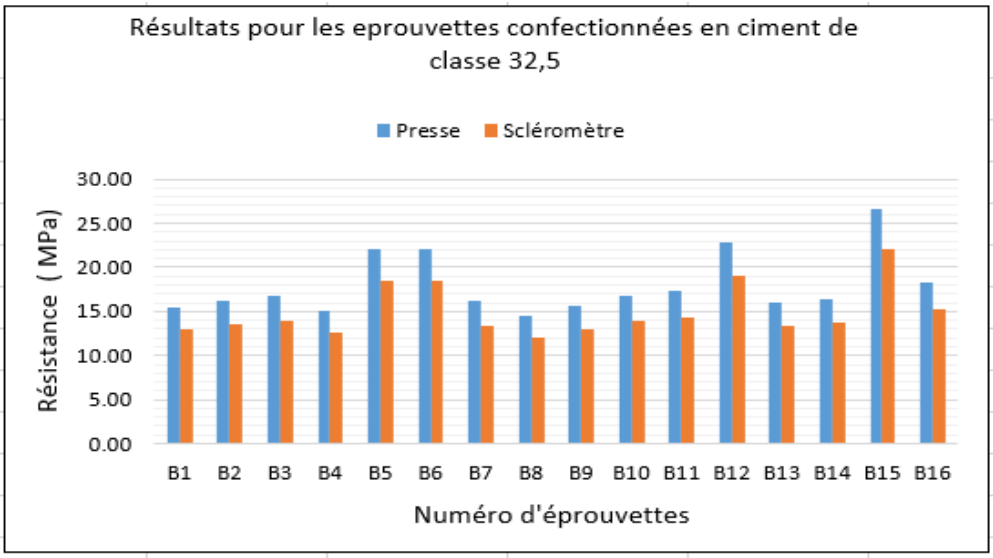


Figure 3.26 – Résistances des bétons à 14 jours

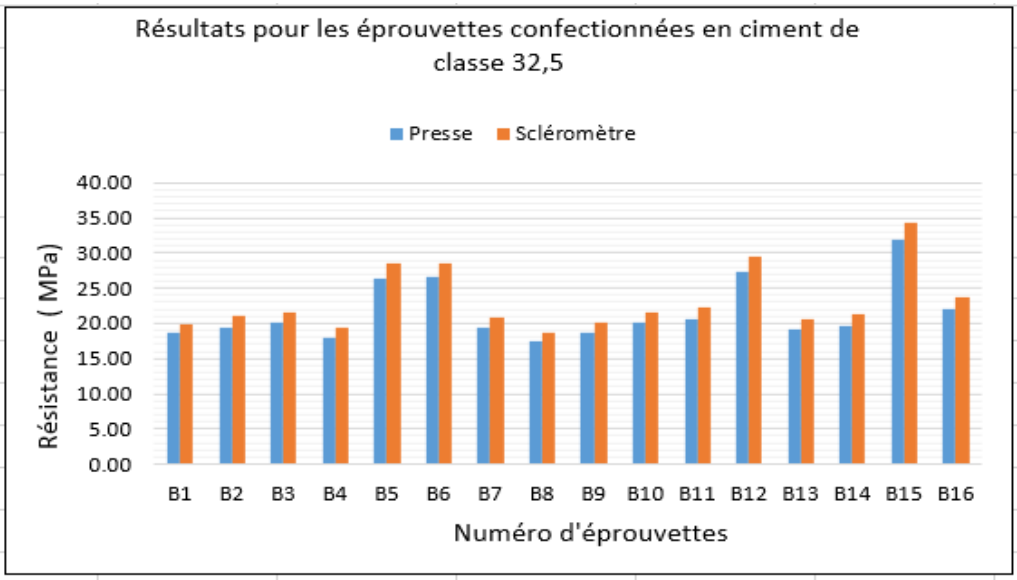


Figure 3.27 – Résistances des bétons à 28 jours

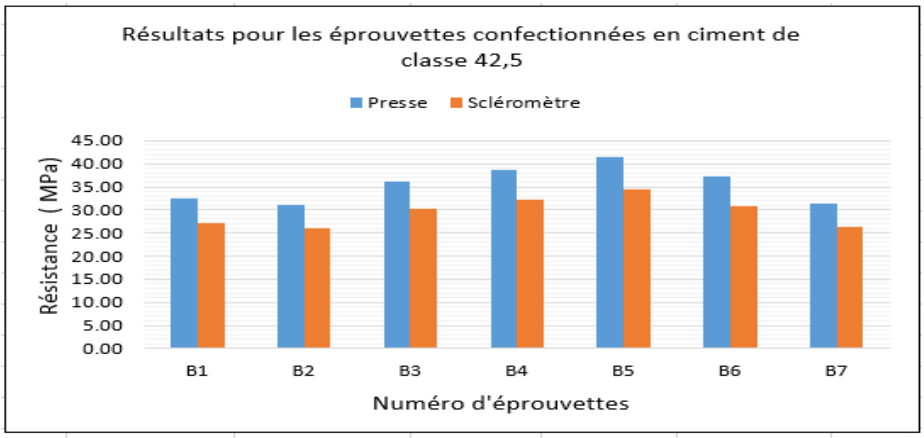


Figure 3.28 – Résistances des bétons à 14 jours

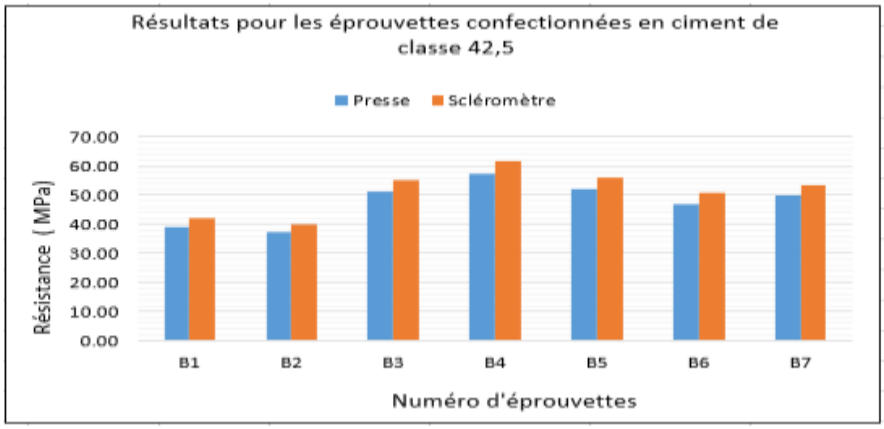


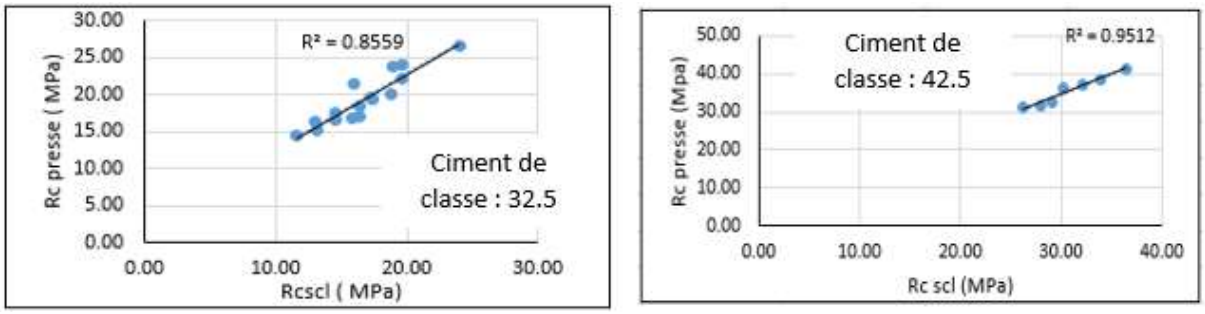
Figure 3.29 – Résistances des bétons à 28 jours

Les Figures 3.26 à 3.29 montrent l'ensemble des correspondances des résultats des essais destructifs et non destructifs aux différents âges. Si pour l'ensemble des compositions, les résistances aux deux premières semaines déterminées par écrasement sont supérieures à celles déterminées par le scléromètre avec une différence maximale de 20 % à 14 jours, cette relation s'inverse pour les bétons plus âgés (28 jours) où les résistances aux quatre semaines déterminées par écrasement sont inférieures à celles déterminées par le scléromètre avec une différence maximale de 7 %.

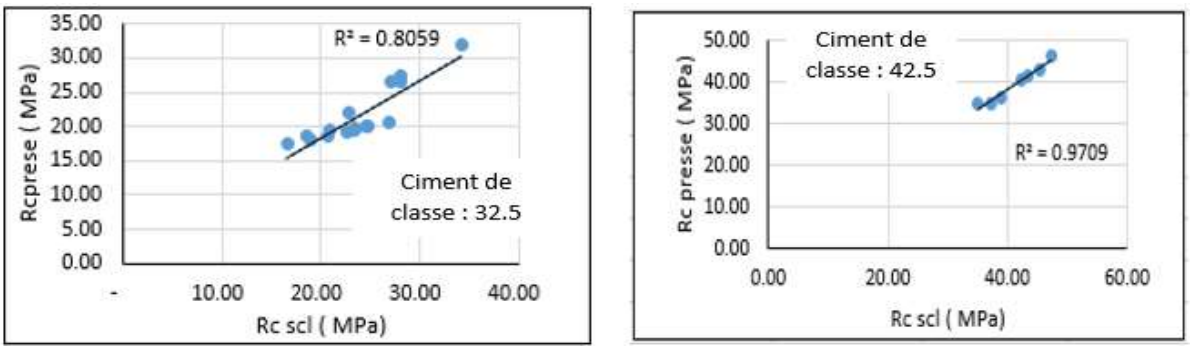
Toutefois les valeurs moyennes des variations des résistances déterminées par ces deux méthodes sont de 18 % et 6 % respectivement à 14 et 28 jours. On note une augmentation pour les deux premières semaines et une diminution à 28 jours, toutefois ces variations diminuent avec le mûrissement du béton. Vue que les valeurs mesurées au scléromètre présentent un écart

très faible par rapport aux valeurs obtenues par écrasement, d'où la méthode non destructive au scléromètre est très fiable pour étudier les éléments structuraux des bâtiments pour un béton de 28 jours ou plus.

Aussi, pour l'analyse des résultats présentés dans le tableau (3.18), des graphiques comparant entre les résistances mécaniques obtenues par les deux méthodes sont établies.



Figures 3.30 – $R_{Cpresse}$ 14J en fonction de la résistance mesurée au Scléromètre



Figures 3.31 – $R_{Cpresse}$ 28J en fonction de la résistance mesurée au Scléromètre

Les résistances de compression à 14jours (RC14J) du béton en fonction des résistances mesurées au Scléromètre présente un coefficient de corrélation : R > 0.800 ; donc, à partir de cela nous constatons que c'est la bonne corrélation.

De même pour les valeurs mesurées (RC 28J) à 28 jours, nous avons un coefficient de corrélation supérieur à 0.800, d'où les valeurs obtenues par mesure au Scléromètres ont été très proches par rapport à celles obtenus par presse.

3.9. Conclusion

Au cours de cette étude, une identification in-situ des résistances en compression du béton des éléments structuraux des bâtiments appartenant à des personnes privées a été réalisée. Il a été constaté que

- 83% des poteaux ont des résistances en compression inferieures aux résistances normatives du béton en compression.
- 82% des poutres ont des résistances en compression inferieures aux résistances normatives du béton en compression.
- 83% des panneaux des dalles ont des résistances en compression inferieures aux résistances normatives du béton en compression.
- 82% des éléments structuraux en béton armé ont une résistance en compression du béton inferieure à la résistance normative du béton en compression.
- Il est probable que les granulats utilisés pour fabriquer les bétons ne remplissent pas les critères granulométriques pour donner un bon béton. D'où, dans beaucoup de chantiers étudiés les résistances mécaniques trouvées ont été très petites par rapport à celles requises pour les normes.
- Comme les écarts des résistances mécaniques mesurées obtenues par les deux méthodes sont très minimes 18 % et 6 % respectivement à 14 et 28 jours. Donc, une étude comparative des résultats obtenus par écrasement et par mesure au Scléromètre a montré que la méthode non destructive au Scléromètre est fiable pour étudier les éléments structuraux en béton plus âgé (à partir de 28 jours).

En fin, au regard des résultats de cette étude, on peut dire que le béton est l'un des facteurs contribuant à l'effondrement des structures en béton armé au Burundi.

Conclusion générale et recommandations

Conclusion générale :

Cette étude a montré que 66% des cas connus d'effondrement des bâtiments en béton armé au Burundi ont eu lieu en Mairie de Bujumbura. Les provinces de Gitega et Bujumbura se partagent à part égales 34% des cas d'effondrement des bâtiments inventories dans cette étude. Après avoir vu que la méthode non destructive au scléromètre est fiable pour étudier les éléments structuraux des bâtiments en béton plus âgé de 28 jours ou plus. Cette étude a permis de constater que plus de 82% des éléments structuraux des bâtiments faisant objet de cette étude présentaient des caractéristiques mécaniques en compression inférieures à celles requises par les normes. Les résultats de cette étude permettent de dire que le béton est l'un des facteurs conduisant à l'effondrement des structures en béton armé au Burundi.

Recommandations :

- Nous recommandons à l'Etat ce qui suit :
  - La mise en place de l'ordre des Ingénieurs par l'OBUHA.
  - La mise en place d'écoles pour la formation et qualification de la main d'ouvre.
- Aux prives :
  - Confier les projets de construction au personnel qualifie.
- A l'université du Burundi :
  - Financer les travaux de fin d'études.

Références bibliographiques

[1] : Ngoc Tan NGUYEN, Évaluation non destructive des structures en béton armé. Étude de la variabilité spatiale et de la combinaison des techniques. Thèse de Doctorat à l'Université de Bordeaux, juin 2014.

[2] : Nguyen N.T. Apport de l'étude de la variabilité spatiale des mesures non destructives en vue d'un meilleur diagnostic des ouvrages en béton armé. L'article soumis au Concours Jeunes Chercheurs, 32èmes Rencontres Universitaires de Génie Civil (AUGC 2014), Orléans, 4-6 juin 2014, 8 p.

[3] : Georges Dreux Jean FESTA 2007 ; Huitième édition : « Nouveau guide du béton et de ses constituants ».

[4] : Jean-Marie GEOFFRAY, mise en œuvre de bétonnage et serrage du béton frais, mai 2008.

[5] : TSAI,Mou-Cheng «Travaux de coffrage. Support pédagogique de formation professionnelle », Burkina Faso, Août 2014.

[6] : SIMUZEYE THEODOSE. 2017 « La problématique des matériaux de construction au Burundi) » Mémoire, Département des sciences de la Terre, Université du Burundi.

[7] : ESIRIS : « identification, investigation et diagnostic des défauts d'un bâtiment existant ». Annales du bâtiment et des Travaux publics, 2014, vol.66, p.206-211.

[8] : Acker P. (1988), comportement mécanique des bétons : apports de l'approche physico-chimique, Thèse de doctorat de l'Ecole National du Bâtiment et des Travaux Publics – 157 p.

[9] : Davis 1998, IAEA 2002, Malhotra 2004. « Essais d'auscultation au scléromètre sur les ouvrages en béton armé ».

[10] : Ismail 2010, Rojas-Henao 2012, Breysse 2012b, Nguyen 2013 : « L'évaluation des bétons ».

[11] : Xavier JOURDAIN – Hélène HORSIN MOLINARO François SOLEILHET : « essais non destructif », Ecole Normale supérieure paris – Saclay, novembre 2028.

[12] : Norme NF EN 18-554 de décembre 2012

[13] : Norme NF EN 13286-2 de décembre 2010

[14] : [Xavier JOURDAIN – Hélène HORSIN MOLINARO François SOLEILHET] Essais destructifs sur éprouvettes en béton et acier d'armature Edité le 12/11/20183 - Essai de compression (NF-EN-12390-3 et NF-EN-12390-13).

Annexe

Annexe 1

Les résultats des informations recueillies dans une campagne effectuée in situ concernent les matériaux utilisés et la mise en œuvre des bétons, ainsi tous les chantiers où la campagne a été menée sont des particuliers.

Tableau 1 - Informations relatives à la mise en œuvre des bétons recueillies sur différents chantiers où notre étude a été faite.

Bâtiments : catégorie privée	Zone d' implantation :	Type d' ouvrage	Type de ciment en terme de résistance	Dosage réellement utilisé sur le chantier (mélange : ciment, sable et gravier)	Est- ce que le malaxage des matériaux était	Est – ce que la main d' œuvre a été qualifiée ?	Granulats ont été lavés ?	Est-ce que les granulats utilisés sont roulés ou concassés ?	Est-ce qui la granulométrie a été observée ?	Type d' eau utilisé	Est-ce que la quantité d' eau utilisée a été	Est-ce que le coulage du béton frais a été vibre ?
H1	Bujumbura mairie	Poteaux	42.5N	1 :1 :2	oui	*oui*	oui	concassé	oui	robinet	oui	oui
		Poutres	42.5 R	1 :1 :2	oui	*oui*	oui	concassé	oui	robinet	oui	oui
		Dalle	42.5 R	1 :1 :2	oui	*oui*	oui	concassé	oui	robinet	oui	oui
H2	Bujumbura mairie	Poteaux	42.5N	1 :1 :2	non	*oui*	non	concassé	nom	robinet	oui	oui
		Poutres	42.5N	1 :1 :2	non	*oui*	non	concassé	nom	robinet	oui	oui
		Dalle	42.5 R	1 :1 :2	non	*oui*	non	concassé	nom	robinet	oui	oui
H3	Bujumbura	Poteaux	32.5 R	1 :1 : 2	non	non	non	roulé	nom	rivière	pas	non
		Poutres	32.5 R	1 :1 : 2	non	non	non	roulé	nom	rivière	pas	oui
		Dalle	32.5 R	1 :1 : 2	non	non	non	roulé	nom	rivière	pas	oui
H4	Bujumbura mairie	Poteaux	42.5 R	1 :1 :2	non	oui	*oui*	concassé	oui	robinet	oui	non
		Poutres	42.5 R	1 :1.5 : 2.5	non	oui	*oui*	concassé	oui	robinet	oui	oui
		Dalle	42.5 R	1 :1.5 : 2.5	non	non	oui	concassé	oui	robinet	oui	oui
H5	Gitega	Poteaux	42.5 R	1 :1 :2	non	*non*	non	roulé	oui	robinet	non	oui
		Poutres	42.5 R	1 :1.5:2.5	non	*non*	non	roulé	oui	robinet	non	oui
		Dalle	42.5 R	1 :1.5:2.5	non	*non*	non	roulé	oui	robinet	non	oui
H6	Bujumbura mairie	Poteaux	42.5 R	1 :1.5:1.5	non	*oui*	non	roulé	nom	rivière	non	oui
		Poutres	42.5 R	1 :2 :2	non	*oui*	non	roulé	nom	rivière	non	oui
		Dalle	42.5 R	1 :2 :2	non	*oui*	non	roulé	nom	rivière	non	oui
H7	Bujumbura	Poteaux	42.5 R	1 :1 : 1	non	non	non	concassé	nom	robinet	non	non
		Poutres	42.5 R	1 :1 : 2	non	non	non	concassé	nom	robinet	non	oui
		Dalle	42.5 R	1 :1 : 2	non	non	non	roulé	nom	robinet	non	oui
H8	Bujumbura mairie	Poteaux	32.5 R	1 :1 :2	non	*non*	non	roulé	nom	robinet	pas	non
		Poutres	32.5 R	pas défini	non	*non*	non	roulé	nom	robinet	pas	oui
		Dalle	32.5 R	pas défini	non	*non*	non	roulé	nom	robinet	pas	oui

H9	Bujumbura mairie	Poteaux	32.5R	1 :1 :2	non	*non*	non	roulé	nom	rivière	pas	non
		Poutres	32.5R	1 :1 :2	non	*non*	non	roulé	nom	rivière	pas	oui
		Dalle	32.5R	1 :1 :2	non	*non*	non	roulé	nom	rivière	pas	oui
H10	Bujumbura mairie	Poteaux	32.5 R	1 :1 :2	non	*non*	non	roulé	nom	robinet	pas	non
		Poutres	32.5 R	pas défini	non	*non*	non	roulé	nom	robinet	pas	oui
		Dalle	32.5 R	pas défini	non	*non*	non	roulé	nom	robinet	pas	oui
H11	Bujumbura mairie	Poteaux	32.5 R	1 :1 :2	non	*non*	non	roulé	nom	robinet	pas	non
		Poutres	32.5 R	pas défini	non	*non*	non	roulé	nom	robinet	pas	oui
		Dalle	32.5 R	pas défini	non	*non*	non	roulé	nom	robinet	pas	oui
H12	Bujumbura	Poteaux	32.5 R	1 :1 : 2	non	non	non	concassé	nom	rivière	pas	non
		Poutres	32.5 R	1 :1 : 2	non	non	non	enroulé	nom	rivière	pas	oui
		Dalle	32.5 R	1 :1 : 2	non	non	non	enroulé	nom	rivière	pas	oui
H13	Gitega	Poteaux	32.5 R	1 :1 :2	oui	*oui*	oui	roulé	oui	rivière	oui	non
		Poutres	32.5R	pas défini	oui	*oui*	non	concassé	nom	rivière	pas	oui
		Dalle	32.5R	pas défini	oui	*oui*	non	concassé	nom	rivière	pas	oui
H14	Gitega	Poteaux	42.5 R	1 :1 :1	non	*oui*	non	concassé	nom	robinet	estimée	oui
		Poutres	42.5 R	1 :1 :2	non	*oui*	non	enroulé	nom	robinet	estimée	oui
		Dalle	42.5 R	1 :1 :2	non	*oui*	non	enroulé	nom	robinet	estimée	oui
H15	Bujumbura mairie	Poteaux	32.5 N	1 :1 :2	non	*non*	non	concassé	nom	rivière	pas	non
		Poutres	32.5 R	1 :1.5 : 2.5	non	non	non	concassé	nom	rivière	pas	oui
		Dalle	32.5 R	1 :1.5 : 2.5	non	non	non	concassé	nom	rivière	pas	oui
H16	Gitega	Poteaux	32.5 R	1 :1 :1	non	*non*	non	roulé	nom	robinet	pas	non
		Poutres	32.5 R	1 :1 :2	non	non	non	roulé	nom	robinet	pas	oui
		Dalle	32.5 R	1 :1 :2	non	non	non	roulé	nom	robinet	pas	oui
H17	Bujumbura	Poteaux	32.5 R	1 :1 :1.5	non	*non*	non	roulé	nom	rivière	pas	non
		Poutres	32.5 R	pas défini	non	non	non	roulé	nom	rivière	pas	oui
		Dalle	32.5 R	pas défini	non	non	non	roulé	nom	rivière	pas	oui

Annexe 2

Tableau 2 - Résultats sur classification de la main d'œuvre aux chantiers étudiés

Chantiers visités	Ingénieur chef de chantier	Conducteur des travaux	Maçons qualifiés ou formés	Ouvriers qualifiés ou formés
I	oui	oui	Certains	Pas de certificat
II	oui	oui	certains	Pas de certificat
III			Pas de certificat	Certains formés
IV	oui	oui	Certains	Certains formés
V	-	oui	certains	Pas de certificat
VI	-		Pas de certificat	Pas de certificat
VII	-	-	Pas de certificat	Pas de certificat
VIII				
IX	-	-	Pas de certificat	Pas de certificat
X				
XI	-	-	Pas de certificat	Pas de certificat
XII		-	certains	Pas de certificat
XIII	-	-	Pas de certificat	Pas de certificat
XIV	-	oui	Pas de certificat	Pas de certificat
XV	-	-	Pas de certificat	Pas de certificat
XVI	-	-	Pas de certificat	Pas de certificat
XVII	-	-	Pas de certificat	Pas de certificat