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

Etude de l'impact de la qualité de l'eau de la rivière Ntahangwa sur le comportement physique et mécanique du béton

Barutwanayo, Johnson

2023-07
UB, FSI
https://repository.ub.edu.bi/handle/123456789/471

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

REPUBLIQUE DU BURUNDI

MINISTERE DE L'EDUCATION NATIONALE ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE DU BURUNDI



FACULTE DES SCIENCES DE L'INGENIEUR

DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL

ETUDE DE L'IMPACT DE LA QUALITE DE L'EAU DE LA RIVIERE NTAHANGWA SUR LE COMPORTEMENT PHYSIQUE ET MECANIQUE DU BETON.

Par

BARUTWANAYO Johnson

Mémoire

Présenté publiquement

en vue de l'obtention du grade de

Master en Sciences de l'Ingénieur

Option : « Génie civil, Aménagement et Maitrise des Projets.»

Composition du jury

Prof. MIKEREGO Emmanuel: Président

Dr-Ir. HATUNGIMANA Daniel: Lecteur principal

Dr-Ir. NIBASUMBA Paul: Directeur

Dr-Ir. BIZINDAVYI Josias: Membre

Bujumbura, Juillet 2023

IDENTIFICATION DES MEMBRES DU JURY

Prof. MIKEREGO Emmanuel : Président

Dr-Ir. HATUNGIMANA Daniel : lecteur principal

Dr-Ir. NIBASUMBA Paul : Directeur

Dr-Ir. BIZINDAVYI Josias : Membre

DEDICACES

A toutes mes connaissances

Je dédie ce travail.

REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à manifester ma profonde reconnaissance à mon directeur de mémoire Dr-Ir. NIBASUMBA Paul, qui m'a suivi de près tout au long du développement de ce travail. J'ai apprécié son aide précieuse quotidienne, ainsi que sa bonne humeur. Je le remercie de ses conseils très pertinents et surtout de sa patience, notamment lors de la phase de rédaction plutôt laborieuse.

Que mes vifs remerciements parviennent aussi à Dr-Ir. HATUNGIMANA Daniel qui n'a pas cessé de m'aider en toutes sortes de difficultés que j'avais malgré d'autres engagements qu'il avait.

Je remercie Monsieur NTAHIZANIYE Philippe le technicien du laboratoire des matériaux de construction du campus KIRIRI pour ses conseils et sa disponibilité.

Je remercie également tous les enseignants qui ont contribué à ma formation depuis l'école primaire jusqu'en Master.

Que mes remerciements parviennent aussi à mes parents, mes collègues de classe et toute personne qui m'a soutenu ou encouragé tout au long de mon parcours académique.

RESUME

Le contrôle de la qualité de l'eau de gâchage et le bon choix du rapport Eau sur Ciment sont quelques-unes des étapes très importantes dans la conception du béton de bonne qualité. L'intitulé de notre sujet de fin d'étude de Master est l'étude de l'impact de la qualité de l'eau de la rivière Ntahangwa sur le comportement physique et mécanique du béton.

Au moment de l'étude au laboratoire, les analyses physico-chimiques de l'eau de la rivière Ntahangwa ont d'abord été réalisées. Ensuite, la caractérisation des matériaux, la confection des éprouvettes et l'essai de ces dernières dans le but d'analyser les variations de la résistance à la compression.

La méthodologie adoptée pour cette étude est basée sur des procédés expérimentaux qui consistent à déterminer la résistance du béton confectionné avec les eaux provenant de différentes origines et les comparer avec celles des bétons de référence à 28 jours.

Les résultats de l'étude montrent que l'impact de la qualité de l'eau de la rivière Ntahangwa en Amont, au milieu et en aval augmente de l'amont vers l'aval du fait de la présence des éléments retardateurs de prise dans l'eau de la rivière Ntahangwa utilisée comme eau de gâchage et les diminutions enregistrées sont dans les marges respectives de 9,6%, 16,9% et 22,1%.

Mots clés : Qualité de l'eau, le rapport E/C, la résistance à la compression.

ABSTRACT

The control of mixing water quality and setting the accurate Water Cement ratio are some of the main steps in the quality concrete design. The main objective of the present work consists of studying the impact of water quality of Ntahangwa River on physical and mechanical behavior of concrete.

During the experimental study, the physico-chemical analyses of Ntahangwa river water were carried out; then the materials characterization, the confection and testing of concrete samples in order to analyze the concrete compressive strength's variation.

The adopted methodology for this study consists of carrying out experimental testing for the determination of concrete strength using water taken from different location of the Ntahangwa River.

The results of the conducted study show that the impact of the water quality in the Ntahangwa taken from different location increases from the upstream to downstream and due to the presence of setting retarding elements respectively in the margins of 9,6%, 16,9% and 22,1%.

Key words: Water quality, Water Cement ratio W/C, Comprehensive strength.

TABLE DE MATIERES

IDENTIFICATION DES MEMBRES DU JURY i
DEDICACES ii
REMERCIEMENTS iii
RESUME iv
ABSTRACT v
TABLE DE MATIERES vi
LISTE DES TABLEAUX viii
LISTES DES FIGURES x
LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS xii
AVANT-PROPOS xiii
CHAP 0 : INTRODUCTION GENERALE 1
0.1 OBJECTIF DU SUJET 2
0.1.1 Objectif global du sujet 2
0.1.2 Objectif spécifique du sujet 2
0.1.3 Les Résultats Attendus 2
0.1.4 Contextualisation, problématique, justification de l'étude et son étendue 2
0.1.5 Méthodologie 3
CHAPITRE I : REVUE DE LA LITTERATURE 5
I.1 Définition 5
I.2 Propriétés des bétons 5
I.2.1 Ouvrabilité 6
I.2.2 Le ciment 8
I.2.3 Les granulats 12
I.3 Les causes des dégradations des structures en béton 16
I.3.1 Les exigences relatives à l'utilisation de l'eau de gâchage 16
I.3.2 Le rôle de l'eau dans le béton 17
I.3.3 Effets de la présence des substances chimiques dans l'eau de gâchage 19
I.3.4 Le rapport E/C 20
I.3.5 Influence des granulats 23
I.3.6 La résistance du béton durci 24

I.3.7 L'essai de compression su béton durci 25
CHAPITRE II : CARACTERISATION DES MATERIAUX 28
II.1 Introduction 28
II.2 La teneur en eau des granulats 28
II.3 L'absorption 29
II.4 Les masse volumiques des granulats 30
II.4.1 La masse volumique apparente 30
II.4.2 La masse volumique absolue ou de la matière 32
II.4.3 L'analyse granulométrique 34
II.4.4 Eau de gâchage 37
II.4.5 L'Essai de prise du ciment 37
CHAPITRE III : LA METHODOLOGIE POUR LA FORMULATION DU BETON 39
III.1 Introduction 39
III.2 La formulation du béton par la méthode ACI 40
III.2.1 Aperçu sur les différentes étapes à suivre dans la composition du béton 40
III.2.2 Les données nécessaires à la formulation du béton 42
III.2.3 La composition proprement dite du mélange par la méthode ACI 43
CHAPITRE IV : LES RESULTATS D'ESSAI ET DISCUSSION 49
IV.1 Introduction 49
IV.2 Les résultats de l'essai de compression 49
IV.2.1 Les résultats de l'essai de compression pour une gâcher d'essai 49
IV.2.2 Les résultats de compression des différentes éprouvettes 49
IV.3 Analyse et discussion des résultats 53
CONCLUSION GENERALE 57
RECOMMANDATIONS 58
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES 59
ANNEXE 61

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I-1:les différents composants des types de ciments (Georges DREUX &Jean FESTA) 10
Tableau I-2:Classe de ciment selon leur résistance 11
Tableau I-3: Limites admissibles des différentes concentrations dans l'eau de gâchage. 17
Tableau I-4: Exigences en eau de gâchage approximative et teneur en air pour différents affaissements et D max des granulats **[Steven H. Kosmatka &Michelle L. Wilson, 2011].**..... 19
Tableau I-5 : La relation les résistances et les rapports ciment-eau pour le D max=25mm [ACI 318-08]. 21
Tableau I-6: La valeur maximum du rapport E/C et la valeur minimum de la résistance spécifique pour différentes conditions d'exposition (ACI 318-08). 24
Tableau I-7:Les valeurs de la résistance moyenne du béton (ACI 318-08). 25
Tableau I-8:Equivalence des résistances obtenues sur cylindres Ø 160*320mm et sur différentes dimensions des cubes. 26
Tableau I-9: Les classes de résistances à la compression pour les bétons lourds. 27
Tableau I-10:Les classes de résistances à la compression pour les bétons légers 27
Tableau II-1:Tableau récapitulatif de calcul de la teneur en eau pour les graviers. 29
Tableau II-2:Tableau récapitulatif de calcul de la teneur en eau pour les sables. 29
Tableau II-3:Tableau récapitulatif de calcul de l'absorption des graviers. 30
Tableau II-4:Tableau récapitulatif de calcul d'absorption du sable. 30
Tableau II-5:Tableau des résultats de calcul de la masse volumique du gravier en vrac. 32
Tableau II-6: Tableau des résultats de calcul de la masse volumique du sable en vrac. 32
Tableau II-7:Les valeurs calculées de la masse volumique absolue du gravier 33
Tableau II-8: Les valeurs calculées de la masse volumique absolue du sable. 33
Tableau II-9: Le tableau des résultats de l'analyse granulométrique pour les graviers. 34
Tableau II-10:Tableau des résultats d'analyse granulométrique pour le sable. 35
Tableau II-11: Les résultats des analyses chimiques des eaux de la rivière Ntahangwa. 37
Tableau II-12:Tableau des résultats sur le temps de prise du ciment en fonction de la qualité de l'eau et la température. 38
Tableau III-1: Affaissement pour différents types de construction. 40
Tableau III-2:Volume du gros granulat compacté à sec par unité de volume du béton. 41
Tableau III-3:Tableau récapitulatif des ingrédients par mètre cube de béton. 46

Tableau IV-1:Tableau de résultats de l'essai de compression pour une gâcher d'essai 49

Tableau IV-2:Résultats des essais de compressions sur les spécimens de références 51

Tableau IV-3: Résultats des essais de compressions sur les spécimens de l'Amont 51

Tableau IV-4: Résultats des essais de compressions sur les spécimens du milieu 52

Tableau IV-5: Résultats des essais de compressions sur les spécimens en Aval 52

LISTES DES FIGURES

Figure I.1: Les composantes du béton et ses éventuels ajouts **(NF EN 206-1).** 5
Figure I.2:Cone d'Abrams (Image tiree sur Google) 7
Figure I.3:Differentes étapes d'exécution de l'essai au Cône d'Abrams 8
Figure I.4:Fuseau de contrôle pour les granulats de grosseur maximale de 8mm 14
Figure I.5: Fuseau de contrôle pour les granulats de grosseur maximale de 16mm 14
Figure I.6: Fuseau de contrôle pour les granulats de grosseur maximale de 31,5mm 15
Figure I.7: Fuseau de contrôle pour les granulats de grosseur maximale de 63mm 15
Figure I.8: les différents états des surfaces des granulats 16
Figure I.9:Les classes de consistance du béton 18
Figure I.10:Influence du rapport E/C sur le coefficient de diffusion des ions chlorures (Conciatori, 2008). 22
Figure I.11 : La courbe de tortuosité. 24
Figure I.12: Influence de la fraction des granulats sur le coefficient de diffusion 24
Figure II.1: Récipient 31
Figure II.2: Eprouvette graduée 33
Figure II.3:Courbe Granulométrique des Graviers. 35
Figure II.4:Courbe granulométrique du sable. 35
Figure II.5:L'eau de gâchage de la rivière Ntahangwa. 37
Figure III.1: Mélange des ingrédients à sec. 47
Figure III.2:Vibration des échantillons sur une table vibrante. 48
Figure III.3:conservation des spécimens sous l'eau pendant 28 jours. 48
Figure IV.1:Les éprouvettes cubiques à tester 50
Figure IV.2:Machine de compression 50
Figure IV.3: comparaison de la résistance trouvée avec l'eau de robinet et la résistance sur l'eau de la rivière Ntahangwa en Amont. 55
Figure IV.4: comparaison de la résistance trouvée avec l'eau de robinet et la résistance sur l'eau de la rivière Ntahangwa au milieu. 55
Figure IV.5: comparaison de la résistance trouvée avec l'eau de robinet et la résistance sur l'eau de la rivière Ntahangwa en Aval. 56

Figure IV.6: comparaison de la résistance trouvée avec l'eau de robinet et les résistances sur différentes points de la rivière Ntahangwa. 56

Figure 0.1:Resultats d'analyse des échantillons de l'eau de la rivière Ntahangwa en Mairie de Bujumbura..... 61

LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS

ASTM: American Society for Testing and Materials

AS: Australian Standard

ACI: American Concrete Institute

CRSNE: Centre de Recherche en Sciences Naturelles et de l'Environnement

E/C : Eau sur Ciment

IS: Indian Standard

ISO: International Organisation for Standardisation

NF EN: Norme Française

w : Teneur en eau

s : écart-type

f'_{cr} : résistance moyenne du béton à l'âge de 28jours.

f'_{c} : résistance spécifique du béton à l'âge de 28jours.

AVANT-PROPOS

Lors de la conception du béton pour une application donnée, plusieurs paramètres doivent être pris en compte. Qu'il s'agisse des conditions environnementales, du type de sollicitation ou d'un choix architectural, les méthodes de dimensionnement prennent en compte comme paramètre principal la résistance à la compression à 28 jours qui dépend grandement de la qualité de ses constituants et du rapport eau sur ciment.

La réaction sulfatique interne est une pathologie susceptible de conduire à la dégradation du béton de certains ouvrages. Elle résulte de la déstabilisation de l'ettringite primaire, hydrate normalement formé au cours de la prise du ciment suite à l'élévation de la température du matériau. Cette réaction chimique se manifeste le plus souvent à l'échelle macroscopique par les phénomènes de gonflement, fissuration et de dégradation des performances mécaniques du béton. L'eau élément moteur d'hydratation est l'un des constituants du béton que la présente étude se préoccupe.

Parfois beaucoup de personnes qui construisent les bâtiments à proximité des rivières utilisent leurs eaux pour confectionner le béton alors que cette dernière peut contenir d'autres éléments chimiques (sulfates, les chlorures, les matières en suspension, le pH acide) préjudiciables à la résistance du béton ce qui fait que la connaissance des caractéristiques de l'eau de gâchage du côté chimique est élément essentiel dans le respect de la norme NF EN 1008, IS 3025 et AS 1379.

C'est pour cette raison que l'idée de notre sujet intitulé "**Impact de la qualité de l'eau de la riviere Ntahangwa sur le comportement physique et mécanique du béton** " trouve naissance; Ainsi, la rivière Ntahangwa a été choisie pour que l'eau de gâchage soit étudiée chimiquement et évaluer son impact sur le béton durci vis à vis de la résistance à la compression.

L'analyse chimique de l'eau, la composition du béton par la méthode ACI et les tests de spécimens en béton sont quelques procédés expérimentaux utilisés pour évaluer l'impact de la qualité de l'eau de la rivière Ntahangwa.

Le présent ouvrage vient compléter les autres études qui ont été faites pour se rassurer du degré de l'impact des eaux des rivières sauvent utilisées comme eau de gâchage sans études préalables.

CHAP 0 : INTRODUCTION GENERALE

De nos jours, la construction des ouvrages en béton est de plus en plus associée à une démarche qualité dans laquelle la résistance de l'ouvrage revêt un caractère très important. Il est donc nécessaire d'étudier le comportement de ces derniers vis-à-vis des différentes actions dont ils sont soumis.

En cas d'ignorance de ces actions et des conséquences pouvant être engendrés sur l'ouvrage, les coûts importants de réparation ou même de reconstruction partielle ou totale peuvent être engagés. La résistance des structures en béton résulte en grande partie des qualités des constituants du béton ; c'est pour cette raison que l'étude de l'impact de la qualité de l'eau utilisée sur les chantiers de construction devient le piédestal de notre étude.

Dans le cadre de cette recherche, l'étude se base principalement sur la qualité de l'eau de la rivière Ntahangwa en Mairie de Bujumbura et son impact sur la résistance à la compression.

Ce mémoire est subdivisé en cinq chapitres, incluant le chapitre 0 d'introduction. Le chapitre I présente une revue de la littérature sur les propriétés du béton à l'état frais et durci. Le chapitre II constitue principalement la caractérisation des matériaux utilisés dans la confection du béton. Le chapitre III décrit la méthodologie adoptée pour formulation du béton et finalement le chapitre IV présente les résultats d'essais, discussions et les conclusions de ce projet de recherche ainsi que les recommandations pour d'éventuels travaux de recherche à venir.

0.1 OBJECTIF DU SUJET

0.1.1 Objectif global du sujet

L'objectif global de ce sujet est de mener l'étude de l'impact de la qualité de l'eau de la rivière Ntahangwa sur le comportement physique et mécanique du béton.

0.1.2 Objectif spécifique du sujet

Parmi les objectifs spécifiques de notre étude, on peut élucider :

- L'étude des propriétés physico-chimiques de l'eau de la rivière Ntahangwa ;
- L'analyse du comportement mécanique des bétons confectionnés avec les eaux d'origines différentes provenant de la rivière Ntahangwa;
- Donner les directives à base des résultats qui ressortent de l'étude menée pouvant soit encourager ou décourager l'utilisation de ces eaux dans la fabrication du béton ;
- Constituer une base de données qui sera utile pour les futurs chercheurs.

0.1.3 Les Résultats Attendus

A la fin de cette étude les résultats attendus sont entre autres :

- Les résistances des bétons fabriqués avec les eaux d'origines différentes ;
- La comparaison de la résistance à la compression obtenue avec les eaux de Ntahangwa à la résistance d'un béton dit de référence (fabriqué avec les eaux de bonne qualité) ;
- Le degré d'impact de ces eaux vis-à-vis de la résistance mécanique du béton.

0.1.4 Contextualisation, problématique, justification de l'étude et son étendue

La plupart des constructions modernes au Burundi comportent généralement des éléments en béton (dalles, poutres poteaux, semelles) dont leur obtention fait intervenir l'eau dans la fabrication du béton lequel est associé à des armatures pour former du béton armé.

Quelquefois, on observe les chantiers implantés près des rivières qui utilisent leurs eaux ; les autres utilisent les eaux de pluie pour fabriquer le béton à défaut des eaux de robinet, ce qui cause de l'ambivalence donnant naissance aux questions suivantes :

- Quelles sont les propriétés physico-chimiques de ces eaux ainsi utilisées ? ;
- Est-ce que les composés chimiques qu'elles contiennent hormis les constituants principaux permettent de les utiliser comme eaux de gâchage du béton selon les règles de l'art ? ;
- Quel est le comportement de ce béton fabriqué vis-à-vis de la résistance à la compression ?

Dans le cadre de la recherche, l'étude s'articule essentiellement sur la qualité de l'eau et son impact sur la résistance à la compression du béton tout en se rassurant que les autres matériaux utilisés dans sa confection sont de qualité acceptable selon les normes en vigueur.

En effet, quelques essais d'étude sont à effectuer pour se rassurer de la qualité de ces matériaux ; les constituants essentiels inertes tels que le sable, les graviers sont ceux de rivières (roulés) ;

L'eau utilisée, objet de notre recherche est de deux sortes en fonction de sa provenance :

- L'eau de rivière NTAHANGWA ;
- L'eau de robinet.

La rivière Ntahangwa est choisie parmi toutes les rivières de la ville de Bujumbura car elle traverse beaucoup de ménages par rapport aux autres rivières que l'on y rencontre ; on aurait pu prendre l'eau des différentes rivières mais, pour des contraintes budgétaires, on s'est uniquement focalisé sur la rivière Ntahangwa pour laquelle les échantillons ont été prélevés en amont et en aval.

Le choix de ces échantillons est fonction de la susceptibilité de pollution plus ou moins accentuée.

0.1.5 Méthodologie

Pour arriver aux objectifs spécifiques cités et répondre à certaines questions ci-haut stipulées, la méthodologie adoptée est la suivante :

i. Analyses physico-chimiques des eaux ;
   - Le PH ;
   - Les sulfates ;
   - Les ions chlorures.

ii. Choix et Caractérisation des matériaux ;
   - La teneur en eau des granulats ;
   - Masses volumiques des granulats ;

- Analyse granulométrique ;
- Module de finesse.
- Capacité d'absorption des granulats ;

iii. Détermination de la composition du béton ;

La détermination de la composition du béton pour une gâchée d'essais est effectuée selon la méthode ACI (American Concrete Institute) optimiste par rapport aux autres concernant le dosage en ciment nécessaire pour une gâchée d'un mètre cube de béton dont les étapes suivies sont décrites ci-après :

1) Le choix de l'affaissement ;
2) Le choix du diamètre maximal des granulats ;
3) Estimation de la quantité de l'eau de gâchage et la teneur en air ;
4) Détermination du rapport eau-ciment ;
5) Calcul du dosage en ciment ;
6) Estimation de la teneur en gros granulats (graviers) ;
7) Estimation de la teneur en granulats fins (sable) ;
8) Ajustement de l'humidité des granulats ;
9) Ajustement d'une gâchée d'essai.

iv. Préparation des matériaux et réalisation du mélange ;
v. Conservation des éprouvettes ;
vi. Essais de compression et discussion des résultats ;

CHAPITRE I : REVUE DE LA LITTERATURE

I.1 Définition

Le béton est un mélange constitué par une pâte pure (ciment +eau +vide), de granulats et éventuellement des produits d'addition (adjuvants). La pâte de ciment (élément actif) enrobe les granulats (éléments inertes en principe) et remplit les vides existants entre eux. C'est un lubrifiant et colle. Des vides d'air peuvent subsister même après mise en place du béton. Les possibilités de variation des paramètres au sein de ce mélange des constituants sont pratiquement illimitées, ce qui permet d'influencer de façon ciblée aussi bien les propriétés du béton frais que celles du béton durci **[6].**



Figure I.1: Les composantes du béton et ses éventuels ajouts ***(NF EN 206-1).***

I.2 Propriétés des bétons

Le béton est un matériau facile à mouler quelle que soit la forme de l'ouvrage, à l'épreuve du temps, économique, résistant au feu et nécessitant peu d'entretien. Matériau composite, mais mise en œuvre sous diverse manières, il répond également à un grand nombre de spécifications :

- ✓ Résistance mécanique notamment la résistance à la compression ;
- ✓ Isolation thermique et phonique ;
- ✓ Etanchéité ;
- ✓ Aspect ;
- ✓ Durabilité ;

- ✓ Sécurité incendie.

Pour utiliser au mieux le béton, il faut connaitre ses propriétés d'une part à l'état frais quand il est plastique qu'on peut le manier, d'autre part à l'état durci quand sa forme ne peut pas être modifiée, mais que ses caractéristiques mécaniques continuent à évoluer durant de nombreux mois, voire des années.

Le béton frais est plastique (ouvrable), déformable et peut remplir les moules aux formes plus variées, ce qui permet tous les effets architecturaux recherchés. Le béton durci est une roche artificielle, durable, résistante **[4].**

I.2.1 Ouvrabilité

L'ouvrabilité caractérise l'aptitude d'un béton à remplir les coffrages et à enrober convenablement les armatures. De nombreux facteurs influent sur l'ouvrabilité : type et dosage en ciment, forme des granulats, le dosage en eau et emploi des adjuvants .Il ne faut cependant pas considérer que le dosage en eau peut être augmenté au-delà d'une certaine valeur dans le seul but d'améliorer l'ouvrabilité. Un excès d'eau se traduit par un phénomène de « ressuage » qui est la création à la surface d'une pièce en béton, d'un film d'eau, générateur des fissures après évaporation. Les autres conséquences de fortes teneurs en eau sont :

- ✓ Diminution de la compacité et, corrélativement, des résistances ;
- ✓ La porosité accrue ;
- ✓ Risque de ségrégation des constituants du béton ;
- ✓ Retrait augmenté ;
- ✓ Un état de surface défectueux se traduisant notamment par du bullage.

La teneur en eau doit être strictement limitée au minimum compatible avec les exigences d'ouvrabilité et l'hydratation du ciment **[4].**

La grandeur qui caractérise l'ouvrabilité est la consistance ; sa mesure peut facilement être effectuée sur chantier par la méthode du cône d'Abrams ou « slump test »

I.2.1.1.1 Détermination de l'affaissement au cône d'Abrahams

I.2.1.1.2 Introduction

Cet essai permet de déterminer la consistance du béton frais en mesurant son affaissement. Cette indication permet d'évaluer l'ouvrabilité du béton. Plus l'affaissement est important, plus l'ouvrabilité est élevée. L'essai est réalisé à l'aide d'un moule appelé le cône d'Abrams [Figure I-2] et ayant la forme d'un tronc de cône, d'une tige, d'un portique de mesure et d'un plateau de base.

L'essai se base sur la norme NF EN 12350-2.

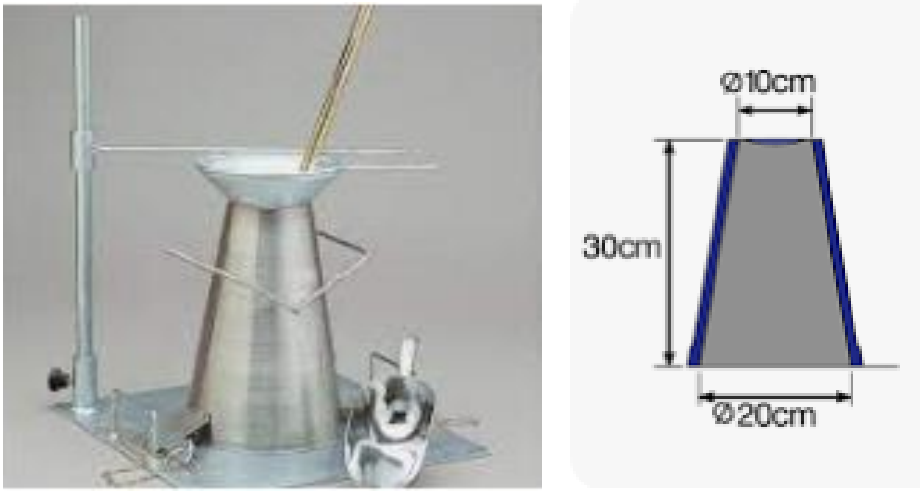


Figure I.2:Cone d'Abrams (Image tiree sur Google)

I.2.1.1.3 Mode opératoire

Tout d'abord, humidifier l'intérieur du moule et le plateau de base. Fixer le moule sur ce dernier à l'aide de deux pattes de fixation. Remplir le moule en trois couches correspondant approximativement au tiers de la hauteur (30 cm) du moule. Chaque couche doit être piquée 25 fois à l'aide de la tige de piquage ; le piquage est uniformément reparti sur toute la section de la couche.

Une fois la troisième couche piquée, araser le béton suivant le bord supérieur du moule à l'aide de la tige de piquage. Démouler le béton frais en soulevant délicatement et régulièrement le moule ; la durée du mouvement ne doit pas dépasser 10 secondes. Mesurer immédiatement l'affaissement en déterminant la différence entre la hauteur du moule et le point le plus haut du corps d'épreuve affaissé. La figure [I-3] résume le mode opératoire de cet essai.

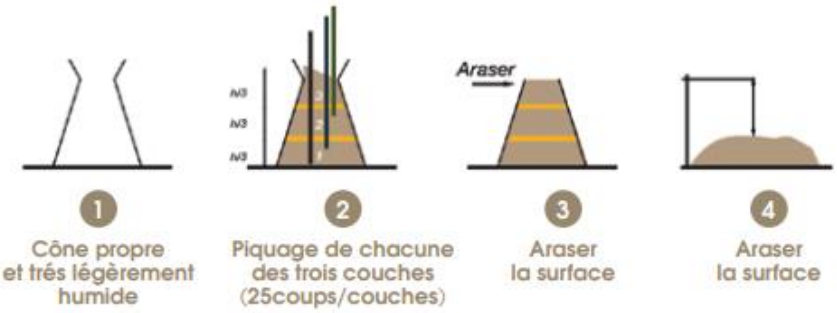


Figure I.3:Differentes étapes d'exécution de l'essai au Cône d'Abrams

I.2.2 Le ciment

Le ciment est un liant hydraulique qui se présente sous forme d'une poudre minérale fine, s'hydratant en présence de l'eau. Il forme une pâte qui fait prise et durcit progressivement, même sous l'eau. C'est un constituant de base du béton.

Le ciment portland est obtenu par cuisson à 1450°C d'un mélange artificiel soigneusement dosé et homogénéisé, de 80% de calcaire et 20% d'argile. Le produit obtenu après refroidissement brusque à l'air est *le clinker*. Durant la cuisson les composants du mélange cru se décomposent et se recombinent entre eux pour former les minéraux du clinker. Leur écriture utilise de façon simplifiée les lettres C pour designer CaO (chaux) ; S pour SiO_2 (silice) ; A pour Al_2O_3 (Alumine) et F pour Fe_2O_3 (oxyde de fer). Le clinker est un matériau hydraulique se présentant sous forme de petits nodules très durs composés minéralogiquement par quatre phases cristallines dont :

- Le silicate tricalcique C_3S ($3CaO, SiO_2$) : appelé aussi Alite. La teneur normale en C_3S du clinker est comprise entre 50 et 70%.
- Le silicate bicalcique C_2S ($2CaO, SiO_2$) : appelé aussi Bélite. La teneur normale en C_3S du clinker est comprise entre 7 et 30%.
- L'aluminate tricalcique C_3A ($3CaO, Al_2O_3$) : appelé aussi Célite. La teneur normale en C_3S du clinker est comprise entre 0 et 18%.
- L'alumino-ferrite tétracalcique C_4AF ($4CaO, Al_2O_3, Fe_2O_3$) : appelé aussi Brownmillérite. La teneur normale en C_3S du clinker est comprise entre 4 et 20%.

Les différentes phases primaires du ciment possèdent des propriétés spécifiques après et pendant l'hydratation suivantes :

- Le silicate tricalcique C_3S ($3CaO, SiO_2$) :
    - ✓ Développement de la résistance à court terme ;
    - ✓ Grand dégagement de la chaleur d'hydratation.
- Le silicate bicalcique C_2S ($2CaO, SiO_2$) :
    - ✓ Développement de la résistance à long terme ;
    - ✓ Grand dégagement de la chaleur d'hydratation.
- L'Aluminate tricalcique C_3A ($3CaO, Al_2O_3$) :
    - ✓ Prise initiale ;
    - ✓ Très grand dégagement de la chaleur d'hydratation ;
    - ✓ Faible résistance aux sulfates.
- L'alumino-ferrite tétracalcique C_4AF ($4CaO, Al_2O_3, Fe_2O_3$) :
    - ✓ Couleur du ciment.

I.2.2.1 Classification du ciment selon leur composition chimique

Les ciments en fonction des pourcentages de leur composition sont classés en cinq types principaux définis par la norme NF P 15-301 et EN 197-1 :

- CEMI : Ciment portland (CPA) ;
- CEMII : Ciment portland composé (CPJ) ;
- CEMIII : Ciment de haut fourneau (CHF) ;
- CEM IV : Ciment pouzzolanique (CPZ) ;
- CEM V : Ciment au laitier et aux cendres (CLC).

Les proportions en masse des différents constituants sont mentionnées dans le tableau ; les constituants en étoile (*) sont des constituants secondaires pour le type de ciment concerné et leur total ne doit pas dépasser 5%.

Tableau I-1:les différents composants des types de ciments (Georges DREUX &Jean FESTA)

	Cim. Port-land	Ciment Portland composé		Ciment de haut fourneau			Ciment pozzolanique		Ciment au laitier et aux cendres	
	CPA-CEM I	CPJ-CEM II/A	CPJ-CEM II/B	CHF-CEM III/A	CHF-CEM III/B	CLK-CEM III/C	CPZ-CEM IV/A	CPZ-CEM IV/B	CLC-CEM V/A	CLC-CEM V/B
Clinker (K)	/95%	/80% ≤94%	/65% ≤79%	/35% ≤64%	/20% ≤34%	/5% ≤19%	/65% ≤90%	/45% ≤64%	/40% ≤64%	/20% ≤39%
Laitier (S)	*	6%≤	21%≤	/36% ≤65%	/66% ≤80%	/81% ≤95%	*	*	/18% ≤30%	/31% ≤50%
Pouzzolanes (Z)	*	total	total	*	*	*	10% ≤ total ≤35% (fumée ≤10%)	36% ≤ total ≤55% (fumée ≤10%)	18%≤ total ≤30%	31%≤ total ≤50%
Cendre siliceuses (V)	*	≤20%	≤35%	*	*	*				
Fumée de silice (D)	*	(fumée	(fumée	*	*	*			*	*
Cendres calciques (W)	*	de	de	*	*	*	*	*	*	*
Schistes (T)	*	silice	silice	*	*	*	*	*	*	*
Calcaires (L)	*	≤10%)	≤10%)	*	*	*	*	*	*	*
Fillers (F)	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*

I.2.2.2 Classification du ciment selon leur résistance

Les ciments peuvent être classés en fonction de leur composition et leur résistance normale. Trois classes sont définies en fonction de la résistance à 28 jours. Ces classes sont notées, classe 32,5 ; classe 42,5 et classe 52,5. Elles doivent respecter les spécifications et les valeurs garanties dans le tableau. Chaque classe de résistance est subdivisée en trois classes de résistance à court terme, la classe L étant réservée aux ciments CEM III selon NF 197-4.

- L : Faible résistance à court terme (indiquée par L: low) uniquement pour le ciment du haut fourneau CEM III.
- N : Résistance à court terme normale (indiquée par N : normal) et
- R : Résistance à court terme élevée (indiquée par R : rapid).

Le tableau récapitule les exigences de la résistance à court terme et de la résistance courante ainsi que du temps de début de prise pour les différentes classes de résistance du ciment. La résistance courante des classes de résistance 32,5; 42,5 est aussi limitée vers le haut.

Tableau I-2:Classe de ciment selon leur résistance

Classe de résistance	Résistances minimales absolues en MPa		
	2 jours	7 jours	28 jours
32,5 L	–	10	30
32,5 N	–	14	30
32,5 R	8	–	30
42,5 L	-	14	40
42,5 N	8	–	40
42,5 R	18	–	40
52,5 L	8	–	50
52,5 N	18	–	50
52,5 R	28	–	50

En fonction des quatre phases cristallines ci-haut définies et le rôle qu'elles jouent dans le béton, cela fait que l'influence de la résistance du ciment sur la résistance à la compression du béton au cours du temps n'est pas linéaire, puisqu'elle dépend du rapport eau sur ciment E/C, des granulats, de la qualité de vibration et de l'âge du béton.

I.2.2.3 La différence entre la classe vraie et la classe commerciale pour un ciment

La classe vraie F_{CE} d'un ciment correspond à la moyenne des résistances obtenues sur un mortier de référence à partir du ciment à caractériser (NF-EN-196-1).

La classe vraie peut également être estimée comme la classe de résistance commerciale à laquelle on ajoute 20% pour tenir compte des fluctuations de ce paramètre ainsi que pour la détermination de la résistance moyenne à la compression du béton. Les trois classes de résistance ci-haut stipulées correspondent aux trois classes vraies estimées qui sont les suivantes :

- Classe commerciale 32,5 a une classe vraie estimée à 39 MPa ;
- Classe commerciale 42,5 a une classe vraie estimée à 51MPa ;
- Classe commerciale 52,5 a une classe vraie estimée à 63MPa.

I.2.3 Les granulats

On appelle « granulats » les matériaux inertes, sables, graviers ou cailloux, qui entrent dans la composition des bétons. Ces granulats peuvent être naturels, artificiels ou provenant du recyclage.

Dans le béton courant, les granulats occupent 65% à 75% du volume du béton durci ; pour cette raison la connaissance des dimensions des granulats est importante pour produire le béton.

Selon leur provenance, on distingue des deux sortes de granulats :

- Granulats naturels roulés (qui sont les plus utilisés) : ils sont les résultats de la désagrégation des roches par l'eau, le vent ou le gel. Ainsi ils se sont formé des dépôts sédimentaires de grains de grosseur allant du sable aux gros blocs, de natures minéralogiques différentes ; ils sont caractérisés par leur aspect de grains arrondis et polis.
- Les granulats artificiels (laitier concassé, granulé, expansé, cendre frittée, schiste expansé, Argile granulée expansée) : Ils proviennent du concassage de roches dures (granits, porphyres, basaltes, calcaires durs...etc) .ils sont caractérisés par un aspect anguleux à arêtes vives.

I.2.3.1 Classification granulométrique

La classe granulométrique d'un granulat (sables, graviers, pierres cassées…) est définie par deux dimensions d_o et d_M, qui correspondent respectivement au plus petit et plus gros des grains constituant ce granulat. Par définition, un granulat de classe d_o/d_M lorsque, pour $d_M>2d_0$, on obtient :

a) Sur la passoire à trous d_M, un refus est inférieur à 10% ;
b) Sur la passoire à trous d_0, un tamisât est inférieur à 10% ;
c) Sur la passoire à trous $d_0/2$, un tamisât est inférieur à 3%.

Les granulats peuvent être subdivises d'après les catégories suivantes :

- Les fines (farines ou fillers) : dont les mailles des tamis sont inférieures à 0,08 ;
- Les sables : -fins dont les mailles sont dans un intervalle de 0,08 à 0,315 ;
  -moyens se situent dans 0,315 à 1,25 ;
  -gros sont dans la marge de 1,25 à 5
- Les graviers : -petits dont les diamètres des passoires 6,3 à 10 ;
  -moyens se situent dans les passoires 10 à 16 ;
  -gros sont dans la marge de 16 à 25.

- Pierres cassées ou cailloux :
  - petits dans les passoires de 25 à 40 ;
  -moyens dans les passoires de 40 à 63 ;
  -gros dans les passoires de 63 à 1000.

Les dimensions de ces mailles et les passoires sont en mm.

I.2.3.2 La granularité

La granularité du granulat est définie par sa courbe granulométrique, déterminée par l'analyse au moyen du tamisage successif. Cette courbe doit être intérieure à un fuseau, fixé à priori et définissant la granularité admissible du granulat.

Le tracé de la courbe granulométrique est rapporté, en abscisses, aux dimensions des mailles de tamis (ou trous de passoires) et, en ordonnées, au pourcentage de granulats passant à travers chacun des tamis (ou passoires).

La graduation en abscisses n'est pas linéaire, mais elle est une fonction logarithmique de forme :

Equation I-1: $Module = 10 * log(ouverture\ des\ tamis\ en\ \mu m) + 1$

Les dimensions des tamis ou passoires à employer pour les analyses granulométriques courantes sont les suivantes :

1) Tamis pour les sables :
   Mailles (en mm) : 0,08 ; 0,16 ; 0,315 ; 0,625 ; 1,25 ; 2,5 ; et 5mm.
2) Passoires (pour les graviers et cailloux) :

   Trous (en mm) : 6,3 ;8 ;10 ;12,5 ;16 ;20 ;25 ;31,5 ;40 ;50 ;62,5 ;80 et 100 mm.

La forme de la courbe granulométrique renseigne sur la composition d'un granulat d0/dM qui peut être plus ou moins riche en petits ou en gros granulats. En vue d'obtenir un béton de bonne qualité, il est recommandé d'utiliser les granulats dont les courbes granulométriques sont inclues dans les fuseaux de contrôle des courbes granulométriques comme indiqué sur les figures suivantes :

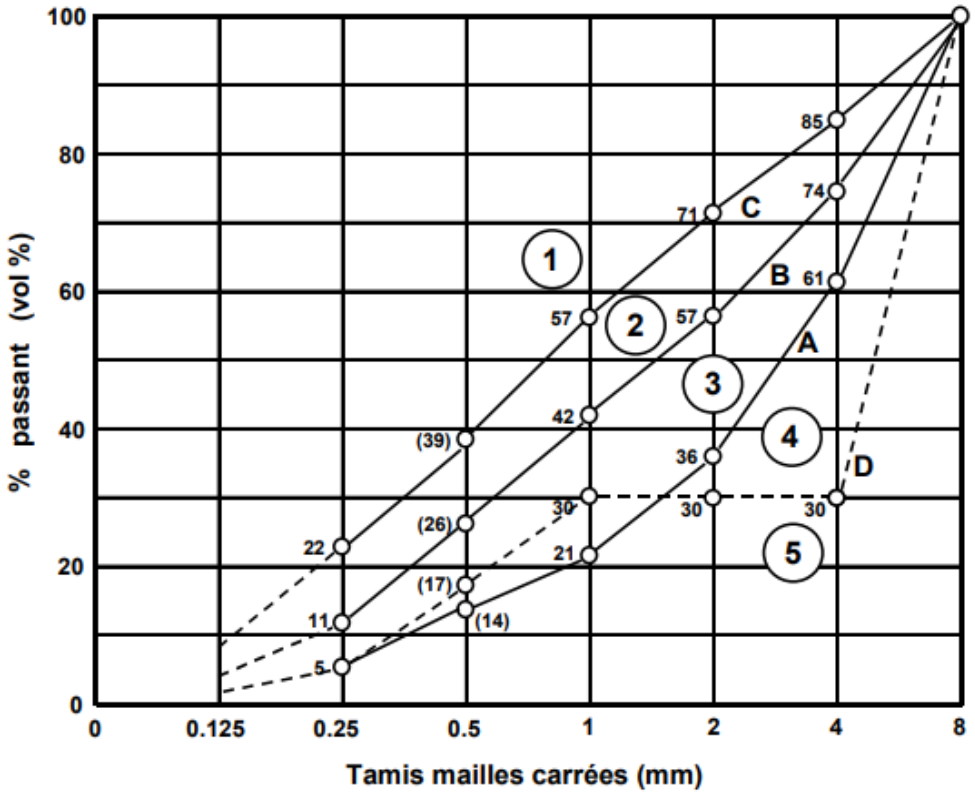


Figure I.4:Fuseau de contrôle pour les granulats de grosseur maximale de 8mm

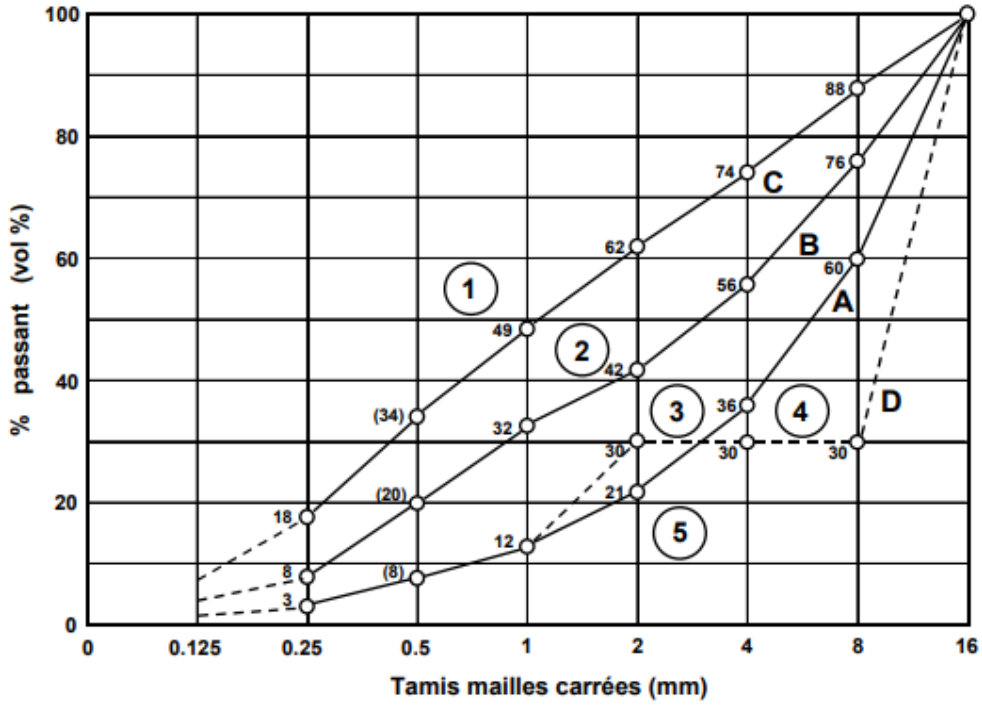


Figure I.5: Fuseau de contrôle pour les granulats de grosseur maximale de 16mm

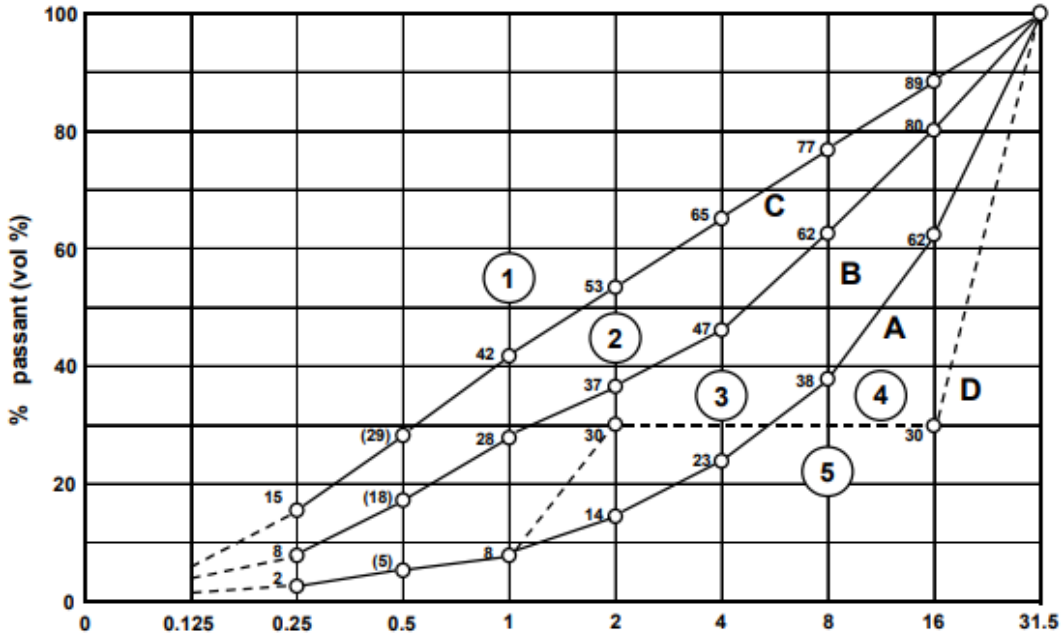


Figure I.6: Fuseau de contrôle pour les granulats de grosseur maximale de 31,5mm

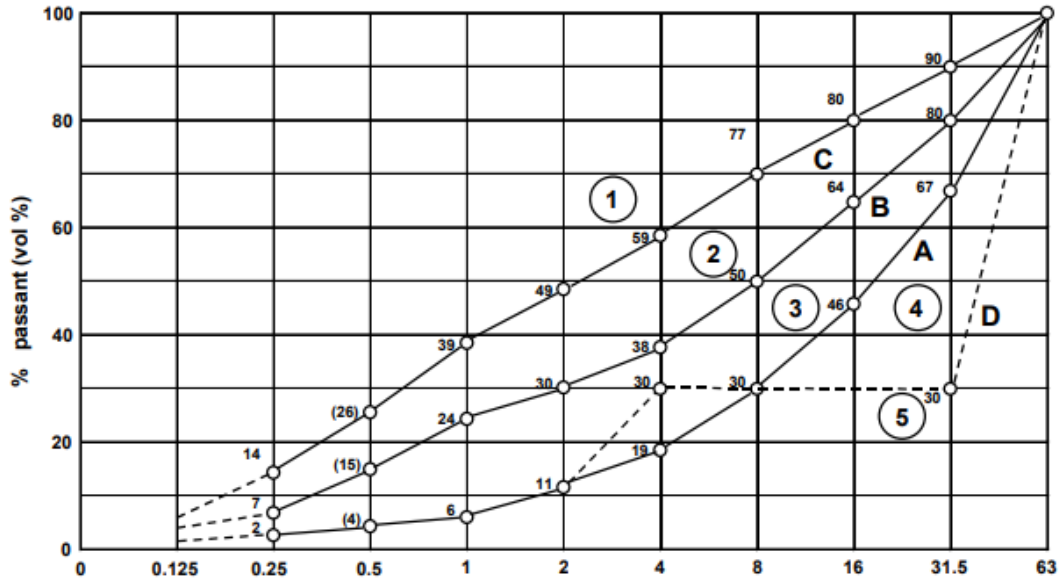


Figure I.7: Fuseau de contrôle pour les granulats de grosseur maximale de 63mm

Légende :

1. Zone défavorable ;
2. Zone à granulométrie discontinue (entre la courbe A et D) ;
3. Zone favorable (entre la courbe A et B) ;
4. Zone acceptable (entre la courbe B et C : besoins en eau et ciment élevés) ;
5. Zone défavorable (au-dessus de la courbe C : besoins en eau très élevés).

Les granulats peuvent présenter plusieurs états de surface, en fonction de l'état d'humidité des surfaces des granulats ou de la quantité d'eau stockée dans les interstices.

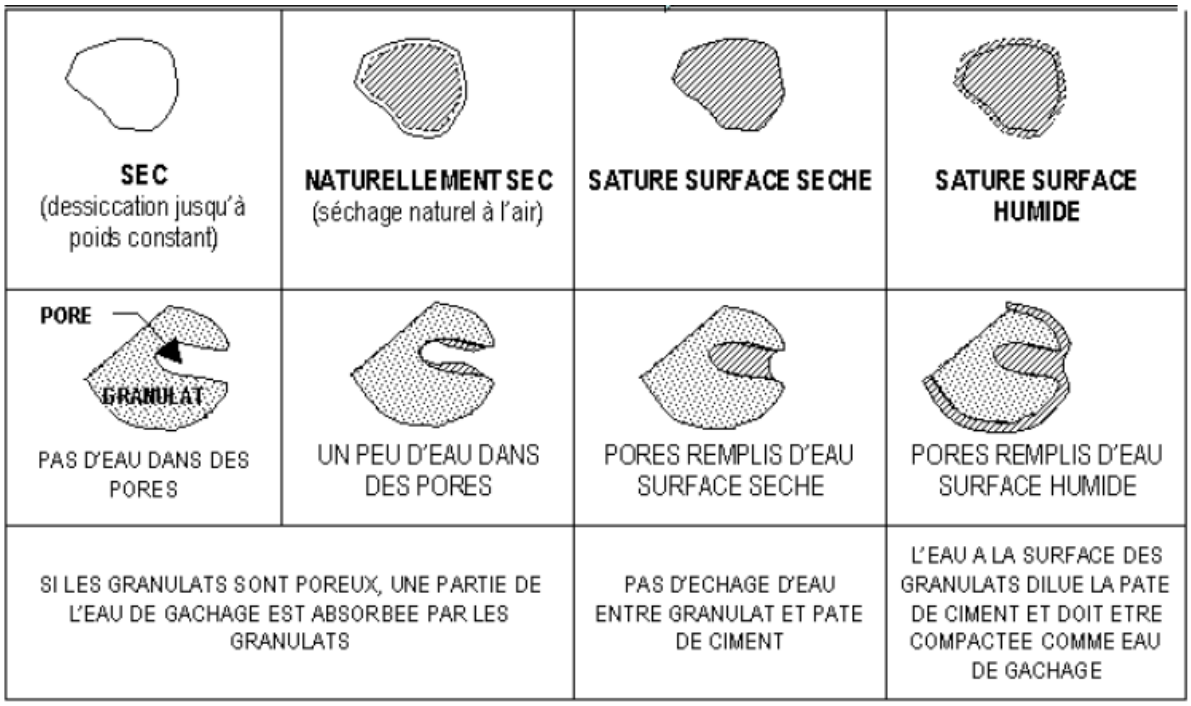


Figure I.8: les différents états des surfaces des granulats

I.3 Les causes des dégradations des structures en béton

I.3.1 Les exigences relatives à l'utilisation de l'eau de gâchage

L'industrie du bâtiment est le second consommateur de l'eau après l'agriculture ; l'élément essentiel qui nous préoccupe est la qualité de l'eau de gâchage et son impact comme le constituant principal régulateur de la résistance du béton. Les observations faites se basent sur le bilan de la qualité de l'eau recyclée et son impact sur certaines propriétés du béton comme celle de la résistance à la compression.

Dans les dernières décennies, il y avait des croyances que l'eau propre à la consommation humaine convient à toute construction envisageable et le bétonnage en particulier ; cependant cette croyance ne peut plus entièrement invoquée car l'eau contenant du sucre peut être potable mais nocif pour des structures en béton et les travaux de bétonnage.

Selon EN 1008 [19] et AS 1379 [13], une concentration en sucre supérieure à 100mg/l dans l'eau de gâchage est préjudiciable au béton.

Dans différents projets de Génie civil, une grande quantité de matériaux sont utilisés et il est nécessaire de tester ces derniers selon certains modèles établis afin que la qualité escomptée du produit soit maintenue.

Divers tests sur l'eau existent pour vérifier sa qualité et son adéquation à la construction en béton ; ces tests sont déterminés conformément à la clause 3.1.1 de la norme IS et NF EN 1008.

Tableau I-3: Limites admissibles des différentes concentrations dans l'eau de gâchage.

Substances	Les limites admissibles de concentration en mg/l
Les matières organiques	2000 mg/l
Les matières inorganiques	3000 mg/l
Les sulfates	4000 mg/l
Les chlorures	2000 mg/l pour le béton non armé et 500 mg/l pour béton armé
Les matières en suspension	2000 mg/l

Ainsi, le pH selon ces deux normes doit être supérieur à 4.

I.3.2 Le rôle de l'eau dans le béton

L'eau joue un rôle important dans le béton. Du fait que les autres constituants sont inertes en principe, l'eau joue en général un double rôle dans le béton tel que *déclencher l'hydratation du ciment et assurer l'ouvrabilité* afin d'avoir une mise en œuvre aisée.

L'hydratation nécessite une quantité d'eau équivalente à 1/5 du poids de ciment et la même quantité est absorbée par la surface des pores **[20].**

L'eau comme élément moteur pour avoir du béton, elle doit être exemptée de toute sorte d'impuretés nuisibles (matières organiques, alcalis, les sulfates, les phosphates, les nitrates, les sucres). L'eau potable convient toujours ; le gâchage à l'eau de mer est possible, mais il vaut mieux l'éviter pour des travaux en élévation.

La quantité d'eau à prendre varie avec un très grand nombre de facteurs : elle est dans le cas général comprise entre 140 et 200 l/m³ **[1].**

Il convient de tenir en compte du degré d'humidité des granulats pour ne prendre en compte aussi que de la quantité d'eau apportée par ces derniers. Aussi si les adjuvants ou des additions sont employés sous formes de solutions ou de suspensions, l'eau apportée par les adjuvants ou des

suspensions sera comptabilisée pour trouver l'eau efficace *(somme de l'eau de gâchage, l'eau apportée par les adjuvants et les additions ainsi que celle absorbée à la surface des granulats*).

Le rôle principal de l'eau de gâchage est de :

- Permettre l'hydratation du ciment qui est responsable du durcissement ;
- Permettre le mouillage des granulats ;
- Permettre la maniabilité du béton frais.

La maniabilité du béton est mesurée par l'essai d'affaissement au cône en vue de classer le béton comme la montre la figure :

Classement des bétons selon la valeur d'affaissement au cône d'Abrams – norme NF EN 206-1		
Classe	**Consistance du béton**	**Affaissement (en mm) au cône d'Abrams**
S1	Ferme	10 - 40
S2	Plastique	50 - 90
S3	Très plastique	100 - 150
S4	Fluide	160 - 210
S5	Très fluide	≥ 220

Figure I.9:Les classes de consistance du béton

Une estimation de la quantité de l'eau requise pour produire des différents affaissements pour le béton à air entrainé et non entrainé peut être obtenue à partir du tableau suivant :

Tableau I-4: Exigences en eau de gâchage approximative et teneur en air pour différents affaissements et D max des granulats **[Steven H. Kosmatka &Michelle L. Wilson, 2011].**

Affaissement (mm)	**Eau, kg/m³ du béton pour D_{max} du granulat donné**						
	10 mm	12.5 mm	20 mm	25 mm	40 mm	50 mm	70 mm
	Béton sans air entraîné						
30-50	205	200	185	180	160	155	145
80-100	225	215	200	195	175	170	160
150-180	240	230	210	205	185	180	170
Quantité d'air approximative (%)	3.0	2.5	2.0	1.5	1.0	0.5	0.3
	Béton à air entraîné						
30-50	180	175	165	160	145	140	135
80-100	200	190	180	175	160	155	150
150-180	215	205	190	185	170	165	160
Teneur en air totale moyenne recommandée pour (%):							
Exposition légère	4.5	4.0	3.5	3.0	2.5	2.0	1.5
Exposition modérée	6.0	5.5	5.0	4.5	4.5	4.0	3.5
Exposition extrême	7.5	7.0	6.0	6.0	5.5	5.0	4.5

I.3.3 Effets de la présence des substances chimiques dans l'eau de gâchage

Les effets de la présence des impuretés dans l'eau de gâchage dans les proportions supérieures aux limites que préconisent la norme P18-303, des conséquences suivantes sont susceptibles de se manifester :

- Les insolubles peuvent être de natures diverses, dans le cas d'argile dans l'eau, on peut craindre une action sur des caractéristiques mécaniques, de même qu'avec des micro-algues qui sont des matières organiques, dans ce dernier cas à la diminution de la résistance s'ajoute un effet d'entrainement d'air diminuant la compacité,
- Des matières dissoutes peuvent être des sels de diverses natures, tels les chlorures dont l'action est corrosive sur les armatures et qui provoque en outre une accélération du phénomène de prise ;
- Les sulfates peuvent réagir avec le ciment pour former de l'ettringite qui s'accompagne de gonflement et peut provoquer une dislocation du béton. En faible proportion ils ont une action sur le temps de prise et du durcissement du ciment pouvant s'ajouter à l'effet du calcaire contenant du ciment ;

- Les sucres retardent la prise du ciment jusqu'à empêcher les phénomènes de prise et durcissement lorsqu'ils sont introduits en grande quantité ;
- Les phosphates et les nitrates diminuent fortement la résistance et présentent une action corrosive importante ;
- Le zinc à un effet retardateur sur prise ;
- Les détergents provoquent la formation de mousse pendant le malaxage, d'où un pourcentage d'air entraine non désiré pouvant réduire fortement la compacité et les caractéristiques mécaniques ;
- Les huiles susceptibles d'être présentes dans les eaux de récupération peuvent si elles sont en trop fortes proportions amoindrir les résistances **[3].**

Les éléments à analyser dans les eaux de gâchage sont nombreux, mais comme les moyens limitent l'étendue de la recherche, on essaie de choisir les éléments qui, une fois présents à forte concentration que les seuils fixés par la norme P18-303 peuvent directement avoir une conséquence à la résistance du béton.

Ces éléments choisis pour chercher ses proportions dans les eaux de gâchage sont :

- ✓ Le PH ;
- ✓ Les sulfates ;
- ✓ Les ions chlorures.

I.3.4 Le rapport E/C

Le dosage en eau se traduit par le rapport E/C qui est un facteur très déterminant quant à la porosité, résistance et la durabilité du béton. On estime que la moitié de l'eau de gâchage sert à l'hydratation du ciment, et l'autre moitié est une eau de mouillage interstitielle qui contribue à la plasticité du béton requise pour sa mise en œuvre **[7].**

L'augmentation du rapport E/C augmente la fluidité du béton et entraine une diminution de la concentration en solides se répercutant aussi à la diminution de la résistance du béton durci, mais aussi diminuant l'effet de la tortuosité ayant un impact négatif à la durabilité du béton. La qualité du béton durci dépend en grande partie de la quantité d'eau du mélange et du rapport E/C **[2].**

Le choix du rapport E/C dépend des deux éléments principaux suivants :

- La classe de l'environnement : la norme ACI définit, pour chaque classe d'environnement, un E/C maximum. Le producteur prendra une petite marge de l'ordre de 0,01 ou 0,02 afin de tenir compte de la fluctuation de ce paramètre.
- Les contraintes mécaniques auxquelles sera soumis le béton durci. En connaissant la résistance moyenne visée, ainsi que la résistance moyenne du ciment, on peut calculer le rapport E/C maximale du béton à l'aide de formules empiriques de **WALZ**.

$$fcm, 28 = 0{,}46 * fcm, 28, cem * (\frac{C}{E} - 0{,}06)$$ **[5].**

Avec :

$f_{cm,\ 28}$: résistance moyenne du béton à k jours

$f_{cm,\ 28,\ cem}$: résistance moyenne du ciment à 28 jours (classe vraie du ciment)

C/E : inverse du rapport E/C

Équation I-2 : Equation traduisant la résistance en fonction du rapport C/E

WALZ dans l'application de sa formule en vue d'avoir une ouvrabilité correcte du béton, il prend une marge de 0,01 et une valeur médiane du rapport E/C de 0,49 permettant de vérifier la résistance moyenne attendue du béton à 28 jours ;

Tableau I-5 : La relation les résistances et les rapports ciment-eau pour le D max=25mm [ACI 318-08].

Résistance à la compression à 28 jours (MPa)	Rapport E/C (par masse) pour le béton non entrainé	Rapport E/C (par masse) pour le béton à air entrainé
45	0.37	-
40	0.42	-
35	0.47	0.39
30	0.54	0.45
25	0.61	0.52
20	0.69	0.60
15	0.80	0.71

Etant donné son effet sur la porosité de la pâte du ciment, le rapport E/C influence directement sur la diffusion des ions chlorures et du dioxyde de carbone dans les bétons non fissurés. Une étude

réalisée par Conciatori (2008) a comparé les coefficients de diffusion obtenus dans les essais de plusieurs recherches sur les bétons de divers rapports E/C **[13].**

Cette comparaison a permis de mettre en évidence la relation entre le rapport E/C et le coefficient de diffusion des chlorures qui augmente exponentiellement avec ce rapport (Figure I-11). Cet étroit lien entre le rapport E/C et la diffusion des ions chlorures peut s'expliquer par la plus faible densité des hydrates formés lorsque le rapport E/C augmente, ce qui menait à une porosité plus importante et plus connectée qui facilite la migration des ions au sein du béton **[13].**

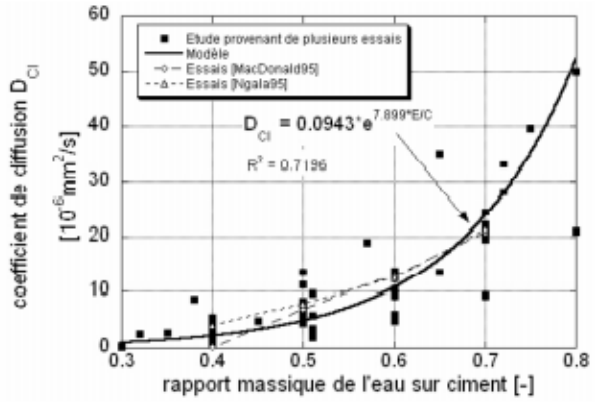


Figure I.10:Influence du rapport E/C sur le coefficient de diffusion des ions chlorures (Conciatori, 2008).

I.3.4.1 Les lacunes des valeurs des rapports E/C données dans le tableau [I-4]

Le tableau [I-4] nous donne les valeurs des rapports E/C en fonction de la résistance spécifique du béton à 28 jours, ces valeurs ont un caractère lacunaire du fait qu'elles sont trouvées sans tenir compte de la résistance du ciment qui est utilisé.

Evaluons donc les lacunes de ces valeurs en utilisant les trois classes de ciment et en se servant de l'équation [I-2] de WALZ.

Soit un béton de résistance moyenne fcm, 28 = 41,39MPa

La classe de ciment 32,5R, de résistance moyenne à 28 jours de 39MPa ;

La classe de ciment 42,5R, de résistance moyenne à 28 jours de 51MPa ;

La classe de ciment 52,5R, de résistance moyenne à 28 jours de 63MPa.

$fcm, 28 = 0{,}46 * fcm, 28, cem * (\frac{C}{E} - 0{,}06)$ **[Equation I-2] [5].**

$$\frac{C}{E} = \frac{fcm,28}{0{,}46 * fcm,28,cem} + 0.06$$

On applique cette relation pour le calcul du rapport C/E inverse du rapport E/C pour ces trois classes de résistance du ciment pour prouver les lacunes des valeurs du tableau [I-4].

- $\frac{C}{E} = \frac{41{,}39}{0{,}46*39} + 0.06 = 2{,}36$, ce qui donne un rapport E/C de 0,422
- $\frac{C}{E} = \frac{41{,}39}{0{,}46*51} + 0.06 = 1{,}824$, ce qui donne un rapport E/C de 0,548
- $\frac{C}{E} = \frac{41{,}39}{0{,}46*63} + 0.06 = 1{,}488$, ce qui donne un rapport E/C de 0,672

Pour ces valeurs trouvées avec les différentes classes de ciment, si on les compare avec les valeurs du tableau [I-4], on conclut que les valeurs du tableau ne sont pas économiques, donc on adopte celles calculées avec la formule de WALZ qui optimise la quantité du ciment à cause du rapport E/C qui augmente légèrement.

I.3.5 Influence des granulats

L'ajout des granulats agit de deux façons majeures sur la diffusion des chlorures. Les granulats ralentissent généralement la migration des chlorures en étant plus dense et en ajoutant de la tortuosité (figure II-18), par contre l'ajout de granulats génère une interface pâte-granulat qui facilite le passage des chlorures (Yang, C.C & Su, 2002). Les résultats obtenus de Yang .C.C & Su (2002), avec un essai similaire à Truc & al. (2002) sur les mortiers de rapport E/C de 0,39 et contenant des différents pourcentages des granulats (0 à 40% vol.) montrent qu'une augmentation de ce pourcentage entraine une diminution du coefficient de diffusion (figure II-14) **[16].**

Globalement, l'ajout de granulats dans la pâte de ciment permet donc de réduire le coefficient de migration.

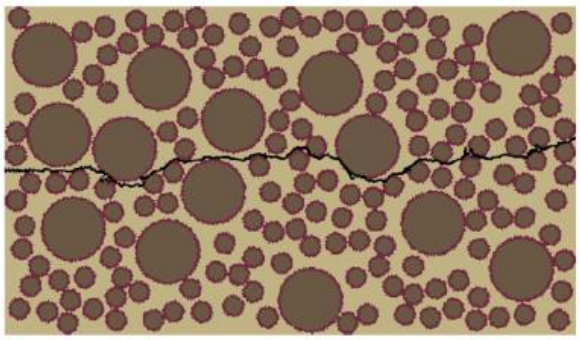


Figure I.11 : La courbe de tortuosité.

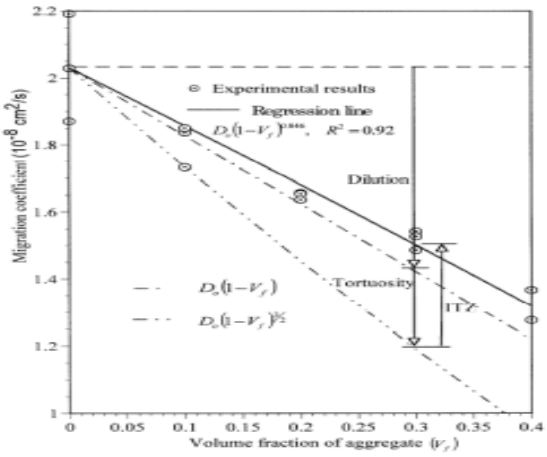


Figure I.12: Influence de la fraction des granulats sur le coefficient de diffusion (Yang. C.C & Su 2002).

I.3.6 La résistance du béton durci

La valeur de la résistance moyenne du béton utilisé dans sa conception doit inclure l'écart-type pour tenir compte des fluctuations pouvant avoir lieu **[1].**

Le calcul de la résistance moyenne du béton à 28 jours suit certaines règles prescrites par la norme ACI 318-08 de la valeur minimale de la résistance spécifique en fonction de l'exposition comme la montre le tableau [I-6].

Tableau I-6: La valeur maximum du rapport E/C et la valeur minimum de la résistance spécifique pour différentes conditions d'exposition (ACI 318-08).

Catégorie d'exposition	**Conditions d'exposition**	**Maximum rapport Eau sur ciment (E/C) par la masse du béton**	**Résistance spécifique du béton à 28 jours, f´c, MPa (psi)**
F0, S0, P0, C0	Béton protégé contre l'exposition au gel-dégel, l'application des produits chimiques ou substances agressives.	Le choix du rapport E/C en fonction de la résistance, ouvrabilité et qualité du parement voulue.	Le choix de la résistance est basé sur les exigences structurelles
P1	Le béton susceptible d'avoir une faible perméabilité sous l'exposition à l'eau.	0,50	28 (4000)
F1, F2, F3	Béton exposé au gel-dégel dans les conditions humides.	0,45	31 (4500)
C2	Béton exposé aux chlorures des sels de déglaçage, de l'eau salée, eau saumâtre, eau de mer.	0,40	35 (5000)

F0 : désigne le béton non exposé aux cycles gel-dégels, aux attaques chimiques

F1 : désigne le béton exposé aux cycles gel-dégels et occasionnellement exposé à l'humidité

F2 : désigne béton exposé aux cycles gel-dégels continu.

Avec les valeurs de la figure [II-20] ACI 318-08 nous donne la formule de calcul de la résistance moyenne du béton pour différentes marges.

Pour les bétons dont la résistance spécifique est inférieure à 35 MPa et pour ceux dont la résistance est supérieure à 35MPa, les équations sont respectivement :

$$f'_{cr}=f'_{c}+1{,}34S \qquad \textit{Equation I-3}\ \textbf{[1]}$$

$$f'_{cr}=0{,}9\,f'_{c}+2{,}33S \qquad \textit{Equation I-4}\ \textbf{[1]}$$

f'_{cr}: Résistance moyenne du béton à l'âge de 28 jours

f'_{c}: La résistance spécifique du béton

S : écart-type

La valeur de l'écart-type que la norme précise varie de 5 à 8,5MPa applicable aussi dans le calcul de la résistance moyenne comme le montre le tableau [I-7].

Tableau I-7:Les valeurs de la résistance moyenne du béton (ACI 318-08).

Résistance spécifique du béton à 28 jours f´c, MPa	Résistance moyenne à la compression du béton à 28 jours f´cr, MPa
Inférieure à 21	f´c+7
21 à 35	f´c+8 ,5
Supérieure à 35	1,1f´c+5

I.3.7 L'essai de compression su béton durci

La résistance des bétons durcis à 28 jours peut être mesurée sur des éprouvettes cylindriques ou cubiques, elle peut donc être définie par deux valeurs :

- Fck-cyl : résistance caractéristiques (fractile 5%) en compression du béton déterminée par essais sur les éprouvettes cylindriques (ø=150mm-H=300mm/ ø=160mm-H=320mm/ ø=110mm-H=220mm).
- Fck-cube : résistance (fractile 5%) en compression du béton déterminée par essais sur les éprouvettes cubiques (côté : 100 ou 150mm).

Selon **NF EN 12390-1**, le choix du format des moules est conditionné par la dimension $\mathbf{D_{max}}$ du granulat.

- La dimension d définissant la section du moule, ne doit pas être inférieure à « **25 racine carré de D** »pour les moules cylindriques.
- Et ne doit pas être inférieure à « **20 racine carré de D** » pour les moules cubiques et prismatiques.

Ainsi, il existe une relation entre les résistances trouvées sur les éprouvettes cylindriques et celles trouvées sur les éprouvettes cubiques ou prismatiques comme le montre le tableau :

*Tableau I-8:Equivalence des résistances obtenues sur cylindres Ø 160*320mm et sur différentes dimensions des cubes.*

Cubes (mm)	Rapport résistance cylindre/cube	
	à la détension	à 28 jours
100 x 100	0,83	0,90
141 x 141	0,87	0,92
150 x 150	0,875	0,925
158 x 158	0,88	0,93
200 x 200	0,90	0,95

La norme **NF EN 206-1** propose deux familles de classes de résistance en fonction de la masse volumique du béton :

- La classe des bétons à la compression de masse volumique normale et des bétons lourds est désignée par la lettre C suivi des valeurs fck- cyl et fck-cube.
- La classe de résistance des bétons légers est désignée par les lettres LC suivies des valeurs fck-cyl et fck-cube.

Elle définit respectivement seize classes de résistance pour les bétons de masse volumique normale et les bétons lourds et quatorze classes pour les bétons légers

Tableau I-9: Les classes de résistances à la compression pour les bétons lourds.

Classe	fck-cyl (en N/mm²)	fck-cube (en N/mm²)
C8/10	8	10
C12/15	12	15
C16/20	16	20
C20/25	20	25
C25/30	25	30
C30/37	30	37
C35/45	35	45
C35/45	40	50
C40/50	45	55
C50/60	50	60
C55/67	55	67
C60/75	60	75
C70/85	70	85
C80/95	80	95
C90/105	90	105
C100/115	100	115

Tableau I-10:Les classes de résistances à la compression pour les bétons légers

Classe	fck-cyl (en N/mm²)	fck-cube (en N/mm²)
LC8/9	8	9
LC12/13	12	13
LC16/18	16	18
LC20/22	20	22
LC25/28	25	28
LC30/33	30	33
LC35/38	35	38
LC40/44	40	44
LC45/50	45	50
LC50/55	50	55
LC55/60	55	60
LC60/66	60	66
LC70/77	70	77
LC80/88	80	88

Les bétons normaux sont ceux dont les masses volumiques sont comprises entre 2000 et 2600kg/m³, les bétons dont leurs masses volumiques sont supérieures à 2600kg/m³ sont classés dans des bétons lourds tandis que ceux dont les masses volumiques sont dans l'intervalle de 800 à 2000kg/m³.

CHAPITRE II : CARACTERISATION DES MATERIAUX

II.1 Introduction

Les granulats sont les constituants de base de la majorité des travaux de Génie civil ; dans le chapitre ci-présent, on s'intéresse à l'identification des matériaux quant à leurs caractéristiques car chacun de ces constituants influe sur le résultat de la résistance à la compression.

Il est donc important de maitriser l'ensemble de leurs propriétés (et influences) ; tant du point de vue de leurs élaborations que de leurs utilisations (mise en œuvre) ; et ce, enfin de maitriser le coût tout en respectant les critères de qualités.

La nature et les gisements conditionnent les propriétés intrinsèques (résistances, porosité, absorption,…) des granulats. Par contre, les caractéristiques géométriques (granularité, forme,..) et de propreté sont fonction du processus d'élaboration. Les granulats que nous caractérisons sont ceux provenant de la rivière Ntahangwa en Mairie de Bujumbura.

II.2 La teneur en eau des granulats

La teneur en eau est égale au rapport de la masse de l'eau contenu dans l'échantillon sur la masse sèche de l'échantillon, elle est déterminée selon la norme **NF P18-554** pour les graviers **et NF P 18-555** pour les sables. Elle s'exprime en pourcentage et est notée (w%).

Elle doit être mesurée afin d'ajuster une quantité d'eau à ajouter lors de la réalisation des matériaux composés tels que le mortier ou le béton, les graves composées ou bien pour permettre une compacité optimale de matériaux de remblais réutilisés.

Afin de déterminer cette teneur en eau d'un granulat, on pèse la masse humide d'un échantillon et on soumet ce même échantillon à une température de 105ºC dans une étuve. Après 24h, on pèse l'échantillon de la masse ainsi séchée.

$$\mathbf{W\%} = \frac{\mathbf{Ph - Ps}}{\mathbf{Ps}} * 100$$

Où Ph : poids du matériau humide

Ps : poids du matériau sec

W% : Teneur en eau exprimée en pourcentage

Équation II-1: Formule de calcul de la teneur en eau des granulats

Pour le cas qui nous concerne, après le passage des granulats dans une étuve à 105ºC, on trouve les résultats récapitulés dans un tableau ci-dessous :

Pour le cas des graviers, on a fait trois échantillons avec différentes masses dont leurs teneurs en eau sont soumises à une moyenne pour avoir la valeur caractéristique.

Tableau II-1:Tableau récapitulatif de calcul de la teneur en eau pour les graviers.

Ech.		**M humide+ Tare**	**M sèche+ Tare**	**M eau**	**Tare**	**M sèche**	**W(%)**
1	Gravier	434,1 g	433,1 g	1 g	151,3 g	281,8 g	0,35
2		598,9 g	598,3 g	0,6 g	283,6 g	314,7 g	0,19
3		501,4 g	500,6 g	0,8 g	144,9 g	355,7 g	0,22

La valeur moyenne à prendre pour les graviers est telle que W=0,26 %.

Pour le cas du sable, les valeurs utilisées pour le calcul de la teneur en eau sont ci-dessous décrites dans le tableau [II-2]:

Tableau II-2:Tableau récapitulatif de calcul de la teneur en eau pour les sables.

Ech.		**M humide+ Tare**	**M humide+ Tare**	**M eau**	**Tare**	**M sèche**	**W(%)**
1	Sable	703,2 g	701,2 g	2 g	328 g	373,2 g	0,54
2		481,2 g	479,4 g	1,8 g	144 g	335,4 g	0,54
		546,6 g	544,8 g	1,8 g	188,7 g	356,1 g	0,51

La valeur moyenne à prendre pour les sables est telle que W= 0,53 % cela signifie que le sable contient une certaine quantité d'eau.

II.3 L'absorption

Certains matériaux granulaires peuvent présenter une porosité interne qui est préjudiciable au dosage en eau des bétons ce qui influe aussi à sa résistance. En effet, le coefficient d'absorption d'eau permet d'évaluer la quantité d'eau retenue par la porosité des granulats afin d'en tenir compte pour le dosage en eau efficace lors de la formulation des bétons **[12].**

On détermine le coefficient d'absorption qui est le rapport de l'augmentation de la masse de l'échantillon après imbibition par l'eau, à la masse sèche de l'échantillon. Cette imbibition est obtenue par immersion de l'échantillon dans l'eau pendant 24h à 20ºC.

Le coefficient d'eau **Abs** est défini par la relation :

Équation II-2: $Abs = \frac{M0-M1}{M1} * 100$

M0=masse de l'échantillon imbibé, surface sèche

M1=masse de l'échantillon sec après passage à l'étuve à 105ºC.

On détermine le coefficient d'absorption du sable et de gravier qui est une caractéristique indispensable pour un granulat poreux.

Les tableaux ci-dessous nous donnent les valeurs des coefficients respectivement pour le gravier et le sable.

Tableau II-3:Tableau récapitulatif de calcul de l'absorption des graviers.

Echantillon		Masse sèche en g	Masse imbibée en g	Abs. en %
1	GRAVIER	433,1	434,7	0,37
2		598,3	600,2	0,32
3		500,6	500,3	0,00

Pour le cas de ce gravier, la valeur moyenne de l'absorption est de ***0,22%.***

Tableau II-4:Tableau récapitulatif de calcul d'absorption du sable.

Echantillon		Masse sèche en g	Masse imbibée en g	Abs. en %
1	SABLE	701,2	701,5	0,043
2		479,4	479,6	0,042
3		544,8	546,3	0,275

Pour le cas du sable, on constate que ce dernier a un coefficient d'absorption de ***0,12 %.***

II.4 Les masse volumiques des granulats

II.4.1 La masse volumique apparente

Les quantités des granulats qui interviennent dans la composition du béton, sont données en termes de masse (masses de granulats secs).

En pratique dans la fabrication, on compose le béton très souvent en mesurant des volumes au lieu de masses (exemple : 1 brouette, 2 brouettes, etc.) .Il est ainsi indispensable de connaitre la masse volumique apparente des granulats.

La masse volumique apparente d'un matériau est la masse volumique d'un mètre cube du matériau pris en tas, comprenant à la fois des vides perméables et imperméables de la particule ainsi que des vides entre les particules .La masse volumique apparente d'un matériau pourra avoir une valeur différente suivant qu'elle sera déterminée à partir d'un matériau compacte ou non compacté. Donc on doit préciser si la masse volumique apparente est à l'état compacté ou non.

La densité apparente à l'état compacté ou non compacté est obtenu par le rapport de la masse apparente d'une unité de volume du matériau à température donnée à la masse d'une même quantité d'eau distillée à même température.

La masse volumique apparente d'un granulat dépend de la forme et de la granulométrie des grains ainsi que le degré de compactage et de l'humidité. La valeur apparente est utilisée dans le cas où l'on effectue les dosages en volume des différents composants du béton.

Mathématiquement, cette masse volumique est calculée par l'équation suivante :

$$\boldsymbol{\rho\ apparente = \frac{M}{Vapparente}}$$

Où **M** : masse apparente de l'échantillon

V apparente : volume apparente de l'échantillon

Équation II-3 : Formule de calcul de la masse volumique apparente

Mode opératoire

L'essai consiste à remplir en matériau sec un récipient vide de volume(V) sans le tasser et le peser ensuite en masse (M) pour en déduire la masse volumique.la figure [III-5] montre le récipient utilisé pour effectuer cet essai.



Figure II.1: Récipient

Après la réalisation de cet essai, les résultats obtenus sont représentés sous formes d'un tableau ci –dessous :

Tableau II-5:Tableau des résultats de calcul de la masse volumique du gravier en vrac.

Désignation	valeur	unité
Hauteur récipient	20	cm
Diamètre du récipient	10	cm
Volume du récipient	1570,796327	cm^3
Tare	7440	g
Poids Brut	9880	g
Poids Net	2440	g
ρ	1,55	g/cm^3
ρ	1553,35	kg/m^3

Tableau II-6: Tableau des résultats de calcul de la masse volumique du sable en vrac.

Désignation	valeur	unité
Hauteur récipient	20	cm
Diamètre du récipient	10	cm
Volume du récipient	1570,80	cm^3
Tare	7990	g
Poids Brut	10120	g
Poids Net	2130	g
ρ	1,36	g/cm^3
ρ	1356	kg/m^3

II.4.2 La masse volumique absolue ou de la matière

Cette grandeur appelée « masse volumique absolue » est intéressante pour les matériaux poreux. Pour y accéder, il faudrait très finement broyer le matériau et mesurer sa masse volumique réelle de la poudre ainsi obtenue.

On définit donc la masse volumique absolue comme étant le rapport de la masse réelle du matériau sur le volume réel auquel on a soustrait les interstices. Cette masse volumique absolue est toujours égale à la masse réelle dans les cas des matériaux compacts non poreux.

$$\boldsymbol{\rho}\ absolue = \frac{\boldsymbol{M}\ mat}{\boldsymbol{V}\ absolu} = \frac{\boldsymbol{M}\ mat}{\boldsymbol{V}\ réel - \boldsymbol{V}\ pores} * 1000 \quad (Kg/m^3)$$

Équation II-4:Formule de calcul de la masse volumique absolue

Etant donné que les matériaux utilisés dans cette étude sont susceptibles d'être poreux, Elle est déterminée selon les normes NF P 18-554 pour les graviers et NF P 18-555 pour les sables. La méthode utilisée est celle de l'éprouvette graduée comme la montre la figure [II-2].



Figure II.2: Eprouvette graduée

On passe au mode opératoire pour trouver cette caractéristique importante.

- ✓ On remplit un récipient d'eau (N1)
- ✓ On verse l'échantillon sec dans un récipient et le niveau d'eau augmente (N2)

La différence entre le niveau N1 et N2 est le volume absolu de l'échantillon.la masse volumique absolue peut se calculer par une formule autrement ci-dessous écrite :

$\boldsymbol{\rho}\ absolue = \frac{Ms}{N2-N1}$, avec Ms : la masse de l'échantillon sec.

Pour le cas des matériaux utilisés dans notre étude, les données d'entrée ainsi que la masse volumique trouvée sont récapitulées dans les tableaux ci-dessous :

Tableau II-7:Les valeurs calculées de la masse volumique absolue du gravier

Ech.	N1 en ml	masse sèche en g	N2 en ml	ρ (en g/cm³)	moyennes-en g/cm³	valeur en kg/m³
1	350	300	453	2,91	2,70	2706,31
2	300	250	400	2,5		
3	300	350	420	2,92		

Tableau II-8: Les valeurs calculées de la masse volumique absolue du sable.

Ech.	N1 en ml	masse sèche en g	N2 en ml	ρ (en g/cm³)	moyennes-en g/cm³	valeur en kg/m³
1	250	160	315	2,46	2,61	2606,09
2	300	120	345	2,67		
3	200	230	285,5	2,69		

II.4.3 L'analyse granulométrique

a. Introduction

L'analyse granulométrique est une opération consistant à étudier la répartition des différents grains d'un échantillon, en fonction de leurs caractéristiques (poids, taille,..) **[12].**

Habituellement, l'analyse granulométrique fournit des proportions de différents diamètres ; cette analyse peut se faire aussi bien par tamisage que par sédimentation ; on dénomme les granulats, fins, sables et gravillon ou caillou. Pour le présent travail de mémoire, l'analyse granulométrique est faite par tamisage.

b. But de l'essai d'analyse granulométrique et son Principe d'essai

L'analyse granulométrique a pour but essentiel de déterminer et de repartir la grosseur et les pourcentages pondéraux respectifs des différentes familles des grains d'un échantillon ainsi que le traçage de la courbe granulométrique **[3].**

Elle est déterminée selon la norme NF P 18-560, elle a été réalisée par la voie sèche. L'échantillon de masse M (0,2D<M<0,6D) préalablement séchée dans une étuve (105°C) et est tamisé à travers une série de tamis qui correspond pour chaque cas de granulat suivant :

Pour notre travail la masse M considérée pour l'analyse granulométrique des granulats (graviers roules) est de 10090 g et comme dans notre laboratoire des matériaux de construction la suite des tamis ci-haut citée n'est pas disponible, la suite des tamis utilisée pour les graviers est la suivante :

- Pour les graviers : 0,5 - 1 - 2- 4- 8 -16 -31,5 - 63mm.

Tableau II-9: Le tableau des résultats de l'analyse granulométrique pour les graviers.

m	D[mm]	RC en (g)	RC en %	P en %
10090	63	0	0,00	100,00
	31,5	2120	21,01	78,99
	16	6860	67,99	32,01
	8	8520	84,44	15,56
	4	9240	91,58	8,42
	2	9620	95,34	4,66
	1	9880	97,92	2,08
	0,5	10010	99,21	0,79

Les résultats de l'analyse granulométrique des graviers sous forme de la courbe représentative.

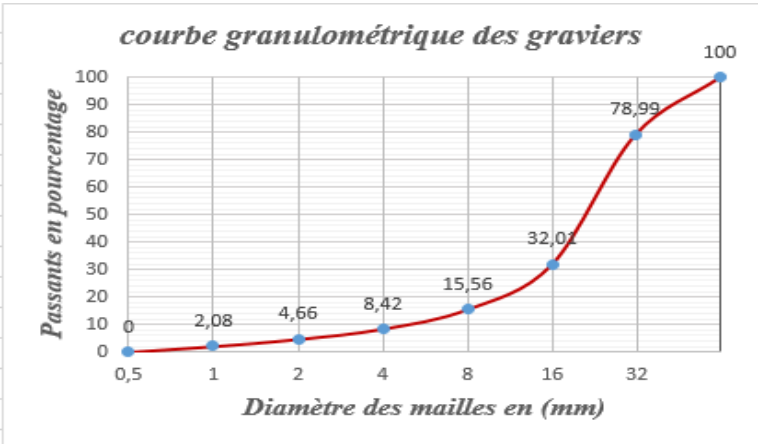


Figure II.3:Courbe Granulométrique des Graviers.

- Pour les sables : 0,063 - 0,125 - 0,25 - 0,5- 1 -2 - 4 mm

Tableau II-10:Tableau des résultats d'analyse granulométrique pour le sable.

m en [g]	D [mm]	RC en (g)	RC en %	P en %
3850	4	30	0.78	99.22
	2	170	4.42	95.58
	1	650	16.88	83.12
	0.5	1730	44.94	55.06
	0.25	3390	88.05	11.95
	0.125	3770	97.92	2.08
	0.063	3850	100.00	0.00

Les résultats de l'analyse granulométrique du Sable sous forme de la courbe représentative.

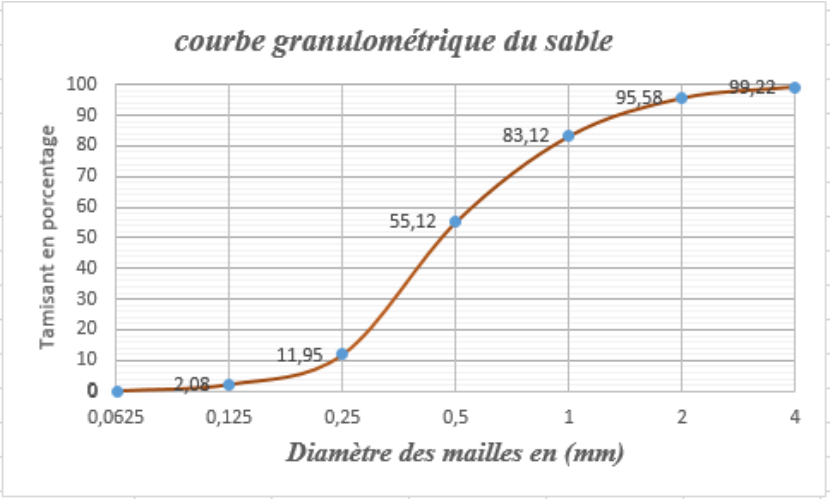


Figure II.4:Courbe granulométrique du sable.

Les courbes granulométriques ainsi obtenues ne passent pas dans les zones acceptables indiquées dans les courbes de références, qui sont aussi les problèmes rencontrés par le chercheur ***Caquot*** *en* ***1937*** *quand il annonça la première fois une théorie générale de la structuration granulaire des bétons de porosité minimale ; Pour lui il n'existe pas une courbe idéale qui conviendra dans toutes les circonstances du fait que ces courbes de références sont conçues avec plusieurs objectifs. Les concepteurs de ces courbes souhaitent obtenir en même temps une bonne ouvrabilité, sans risque de ségrégation et une qualité de parement irréprochable, par conséquent, une large variété de distribution sont possibles* **[19].**

- ***Le module de finesse***

Le module de finesse d'un granulat est égal au 1/100e de la somme des refus, exprimés en pourcentages sur les différents tamis de la série suivante : 0,063 - 0,125 - 0,25 -1 - 2 et 4mm.

$$Mf = \frac{1}{100}\sum refus\ cumulé\ en\ \%\ des\ tamis$$

Le calcul du module de finesse donne une valeur telle que :

$$\boldsymbol{Mf = \frac{0{,}78+4{,}42+16{,}88+44{,}94+88{,}08+97{,}91}{100} = 2{,}53}$$

Des recherches sur l'influence de la finesse des sables sur diverses qualités du béton ont conduit à délimiter certains fuseaux de granularités admissibles tels que :

- Pour 2,2< Mf <2,8 convient bien pour obtenir une ouvrabilité satisfaisante et une bonne résistance avec des risques de ségrégation limites,
- Pour 1,8< Mf <2,2 est à utiliser si l'on cherche particulièrement la facilite de mise en œuvre au détriment probable de la résistance,
- Pour 2,8< Mf <3,2 correspond à des sables à utiliser pour la recherche des résistances élevées, mais on aura en général, une moins bonne ouvrabilité et des risques de ségrégation.

Le module de finesse calculé pour le cas de notre sable étudié montre que c'est un sable qui convient pour avoir une bonne ouvrabilité et la résistance satisfaisante avec risque de ségrégation **[3].**

II.4.4 Eau de gâchage

L'eau utilisée dans notre étude provient de la rivière Ntahangwa; cette eau est prélevée dans trois endroits différents ainsi que l'eau de robinet .Les eaux provenant de la rivière Ntahangwa sont montrées sur la figure suivante :



Figure II.5:L'eau de gâchage de la rivière Ntahangwa.

En effet, cette eau possède des caractéristiques chimiques particulières comme le montre le tableau suivant :

Tableau II-11: Les résultats des analyses chimiques des eaux de la rivière Ntahangwa.

Paramètres	Amont	Aval
pH	5,66	6,54
$S0_4^{2-}$(mg/l)	0,123	0,968
Cl^- (mg/l)	90,88	89,81

Les valeurs trouvées sont tellement faibles parallèlement à celles préconisées par la norme, le pH doit être strictement supérieur à 4 selon ISO 4316; $S0_4^{2-}$ doit être au plus égal à 400mg/l et Cl^- 2000g/l pour le béton non armé ; 500mg/l pour le béton armé.

II.4.5 L'Essai de prise du ciment

Le temps de prise du ciment est principalement influencé par le type de ciment, la qualité de l'eau de gâchage et la température ambiante lors du gâchage. Le présent essai de prise du liant hydraulique est effectué à l'aide de l'appareil de Vicat afin de mesurer le temps nécessaire pour que le liant hydraulique (ciment) se solidifie.

II.4.5.1 Le principe de l'essai

Dès que le ciment se mélange à l'eau, l'hydratation commence et les caractéristiques de la pâte obtenue sont évolutives dans le temps. Tant que cette hydratation n'est pas encore avancée reste

en mois malléable voir plastique, mais au bout d'un certain temps, le matériau devient de plus en plus difficile à manier et sa température augmente : il fait prise et s'apparente à un solide.

On mesure l'enfoncement d'une aiguille de diamètre 1,3mm à la partie mobile de l'appareil de Vicat dont la masse totale est de 500g, dans une pâte de ciment maintenue dans le moule tronconique ; lorsque l'aiguille s'arrête à la distance d=4mm de la plaque de base, on dit qu'il y a début de prise et lorsque l'aiguille avec l'accessoire annulaire ne s'enfonce plus de 0,5mm par rapport au sommet du moule tronconique, on a atteint le temps de fin de prise.

II.4.5.2 Manipulation

La réalisation de cet essai suit certaines étapes ci-dessous :

- Remplir le moule de Vicat de pâte de consistance normalisée et l'araser ;
- Régler l'aiguille : l'abaisser jusqu'à la base pour ajuster le repère à zéro, relever l'aiguille en position d'attente ;
- Au bout d'un certain temps, placer le moule et la plaque dans l'axe de l'aiguille ;
- Abaisser l'aiguille jusqu'à ce qu'elle arrive au contact de la pâte ; lâcher brusquement les parties mobiles et laisser pénétrer l'aiguille verticalement ;
- Effectuer la lecture à la fin de chaque pénétration ou 30 secondes après la libération de l'aiguille jusqu'à atteindre d=4mm ±1.

Pour le cas de notre travail, le temps de prise étant d'une part influencé par la qualité de l'eau, on réalise cet essai sur l'eau prélevée dans la rivière Ntahangwa dans trois localités différentes dont leur temps de prise sont comparés avec le temps de prise trouvé sur celui calculé avec l'eau de robinet prise comme référence et les résultats sont résumés dans le tableaux suivant :

Tableau II-12:Tableau des résultats sur le temps de prise du ciment en fonction de la qualité de l'eau et la température.

Numéro	Désignation	Température en degré	Temps de prise
1	Eau Ntahangwa (amont)	29 º C	4h 20min
2	Eau Ntahangwa (milieu)	28,5 º C	4h 30min
3	Eau Ntahangwa (aval)	27 º C	5h 05min
4	Eau robinet	27 º C	3h 47min

CHAPITRE III : LA METHODOLOGIE POUR LA FORMULATION DU BETON

III.1 Introduction

Le béton est un mélange dont sa composition a une profonde influence sur ses caractéristiques mécaniques. L'obtention des caractéristiques requises pour ce béton passe impérativement par l'adoption et l'optimisation de sa formulation conformément aux exigences constructives (*classe de résistance, domaine d'utilisation et la classe d'exposition*) et aux exigences de mise en œuvre (*classe de consistance et le diamètre maximale du gros granulat*). C'est pour cette raison que la démarche adoptée pour une meilleure obtention des caractéristiques requises comporte deux phases :

L'approche d'une composition du béton par la méthode ACI [méthode des volumes absolus ou méthode de SCRAMTAIEV] **[15]** qui n'a qu'autre but sauf celui de la recherche de la compacité maximale qui est directement proportionnelle à la résistance à la compression conformément aux théories de Caquot sur la composition granulaire des mélanges, que les connaissances actuelles sur le béton ont confirmées pour l'essentiel **[18].**

La deuxième phase consiste à ajuster expérimentalement cette formulation en fonction des résultats obtenus par des essais effectués en laboratoire (slump test).

Le chapitre ci-présent nous présente les étapes chronologiques de composition du béton par la méthode ACI la plus simple, économique, rapide et la composition d'une gâchée d'essais dans le but de valider l'approche de la composition **[1].**

III.2 La formulation du béton par la méthode ACI

III.2.1 Aperçu sur les différentes étapes à suivre dans la composition du béton

Etape 1 : choix de l'affaissement

D'ordinaire, le choix de l'affaissement est fonction de la destination du béton. Dans le cas où l'affaissement n'a pas été dicté, les valeurs appropriées sont choisis dans le tableau suivant :

Tableau III-1: *Affaissement pour différents types de construction*.

Types de construction	Affaissement maximal en (mm)	Affaissement minimal (mm)
Murs de fondation et semelles renforcés	80	20
Semelles filantes et murs non armés	80	20
Poutres et murs renforcés	100	20
Colonnes de bâtiments	100	20
Pavements et dalles	80	20
Béton de masse	80	20

Etape 2 : choix du diamètre maximal (D max) des gros granulats

Il est en fonction de l'épaisseur des éléments, des distances entre les coffrages et les armatures, le but est de faire en sorte que l'écoulement du béton dans le coffrage ne soit pas empêché par de gros granulats qui viendraient bloquer le passage, en plus du fait que les granulats sont gros plus il y a économie de ciment .La limite supérieure pour la dimension des gros granulats sont les suivants:

- Pour le béton armé, le diamètre maximal ne devrait pas dépasser le cinquième de la dimension minimale entre les formes (D max $\leq$d/5), les trois-quart de l'espacement entre les armatures ;
- Pour les dalles, la taille maximale ne devrait pas excéder le tiers de l'épaisseur de la dalle ;
- En plus de ces limites, il a été prouvé expérimentalement que lorsque le diamètre maximal des granulats excède 40 mm, la résistance diminue en raison de la diminution de la force d'adhérence et la matrice.

Etape 3 : Estimation de la quantité de l'eau de gâchage et de l'air

La maniabilité du béton dépend de la teneur en pâte, de la quantité de l'air emprisonné ou entrainé, du diamètre maximal, de la granulométrie et de la forme des particules des granulats. Une

estimation de la quantité d'eau requise pour produire différents affaissement pour le béton à air entrainé et non entrainé peut être obtenue à partir du tableau [I-3].

Etape 4 : le calcul de C/E inverse d'E/C

Le choix du rapport E/C est une étape importante du fait qu'une résistance du béton en découle .La résistance du béton est inversement proportionnelle à celui-ci .ce rapport est estimé par l'équation I-2 de WALZ permettant l'optimisation de la pâte de ciment.

Etape 5 : calcul de la quantité de ciment

Une fois qu'on connait la valeur correspondant à l'eau de gâchage et le rapport E/C, la quantité du ciment est calculée par unité de volume de béton en divisant la teneur en eau par le rapport E/C**.** La pâte de ciment durci est une matière poreuse. Comme l'ont montré plusieurs chercheurs [Powers & Brownyard 1946-1947], la résistance du béton dépend directement de son volume solide.

Etape 6 : Estimation de la quantité de gros granulats

La masse volumique en vrac des gros granulats est déterminé en premier. Elle est alors multipliée par un coefficient tabulé, qui dépend de la taille maximale du granulat et du module de finesse du sable comme l'indique le tableau [III-2].

Tableau III-2:*Volume du gros granulat compacté à sec par unité de volume du béton.*

Grosseur maximal des granulats en [mm]	**Volume du gros granulat compacte à sec par unité de volume du béton pour différents modules de finesse de granulats fins**			
	2,40	**2,60**	**2,80**	**3,00**
10	0,5	0,48	0,46	0,44
12,5	0,59	0,57	0,55	0,53
20	0,66	0,64	0,62	0,60
25	0,71	0,69	0,67	0,65
40	0,76	0,74	0,72	0,70
50	0,78	0,76	0,74	0,72
75	0,82	0,80	0,78	0,76
150	0,87	0,85	0,83	0,81

Etape 7 : Estimation de la teneur en granulat fin

Le volume (rendement volumique) que doit occuper 1m³ de béton frais est de 1000 litres. Une fois que le volume du ciment, d'eau, d'air et d'agrégat grossier est déterminé, la différence du volume total du béton et le volume de ces éléments donne le volume d'agrégats fins .Le poids d'agrégats fins est alors obtenu en multipliant ce volume par la densité d'agrégats fins.

Etape 8 : Ajustement de l'humidité des granulats

Si les agrégats sont à l'état naturellement sec, ils absorbent une partie de l'eau de gâchage, réduisant ainsi le rapport E/C et la maniabilité .D'une autre part si les granulats sont à l'état saturé surface humide, l'eau à la surface des granulats va contribuer à l'eau de gâchage, augmentant le rapport E/C et la maniabilité mais réduisant la résistance. C'est pour cette raison que ces effets doivent être considérés dans les calculs des mélanges des bétons.

Etape 9: Ajustement de la gâchée d'essai

Il est nécessaire de préparer une gâchée d'essai. Cette gâchée doit être testée pour confirmer que l'affaissement fixé au départ correspond à celui trouvé avec une gâchée d'essai. Des ajustements devront être effectués si les proportions d'une gâchée ne satisfont pas aux estimations originales.

- Si l'affaissement est incorrect, une nouvelle quantité de l'eau de gâchage devra être estimée à partir de l'observation ou une diminution d'environ 2kg/m³.
- Tout ajustement modifiera le rendement et, par conséquent de nouvelles quantités des composants d'une gâchée doivent être recalculées, en suivant la procédure de l'étape 3.

III.2.2 Les données nécessaires à la formulation du béton

La formulation du béton par la méthode ACI exige la connaissance de certaines caractéristiques de composants du béton, pour le cas de notre travail de recherche ces caractéristiques sont :

i. Classe du ciment utilisé : 42,5R
ii. Poids spécifique du ciment : 3,15
iii. Poids spécifique de
    a. Gros granulats : 2,706
    b. Granulats fins : 2,606
iv. Absorption d'eau
    a. Gros granulats : néant

b. Granulats fins : néant

v. Teneur en eau

a. Gros granulats : 0,41%

b. Granulats fins : néant

vi. Le module de finesse du sable : 2,53

vii. La masse volumique apparente des gros granulats : 1553,35 kg/m³

Toutes ces caractéristiques ci-haut étiquetées, leurs calculs ont été détaillés dans le chapitre précédent. La connaissance de ces dernières permet de calculer les valeurs correspondant aux spécifications ci-dessous lesquelles donnent la composition finale du mélange.

III.2.3 La composition proprement dite du mélange par la méthode ACI

La composition du mélange suivant la méthode ACI se fait de façon chronologique comme précédemment décrite :

1. ***Le choix de l'affaissement*** : Afin de faciliter la mise en œuvre du béton, l'affaissement choisi appartient à la deuxième classe ; donc de consistance plastique [70mm] avec une tolérance de plus ou moins 2cm;
2. ***Le choix du diamètre du gros granulat*** : Le diamètre maximal du gros granulat est tel que D max=25mm ;
3. ***Estimation de la quantité de l'eau et de l'air*** : En fonction de l'affaissement et du diamètre maximal choisi, le tableau [I-3] nous donne la teneur en eau de gâchage de 193kg/m³ et la teneur en air de 1,5%. En effet, selon ASTM, la valeur de la teneur en eau nécessaire pour un mètre cube de béton est ajustée suivant la nature des granulats utilisés :
   - Pour les granulats concassés, la quantité d'eau est réduite de 20kg/m³ ;
   - Pour les granulats sub-angulaires, elle réduite de 10kg/m³ ;
   - Pour les granulats roulés, elle est réduite de 25kg/m³.

Pour notre cas, les granulats utilisés sont ceux roulés ce qui fait que la quantité de l'eau devient :

193kg/m³-25kg/m³=168kg/m³

4. ***Le calcul de C/E ou E/C*** :

Il se fait sur base de l'équation [I-2] donnée par WALZ qui vérifie la résistance moyenne du béton à 28 jours en fonction du rapport C/E.

f ck'=25MPa

Avec les tableaux [I-4] et la figure [I-14] qui spécifient respectivement la résistance spécifique minimale fc' en fonction des conditions d'exposition et la valeur de l'écart-type.

$\text{fcm}, 28 = 30\text{MPa} + 1{,}34 * 8{,}5\text{MPa} = 41{,}39\text{MPa}$

Equation: f cm, 28=0, 46*f cm, 28, cem*****(C/E-0, 06)

$$\frac{\text{C}}{\text{E}} = \frac{\text{fcm,28}}{0.46*\text{fcm,28,cem}} + 0{,}06$$

fcm, k, Cem: résistance du ciment 42,5R qui est de 48MPa.

$\frac{C}{E} = \frac{41{,}39}{0{,}46*48} + 0{,}06 = 1{,}93$ .Cette valeur correspond à un rapport E/C de 0,517

5. Calcul de la quantité de ciment

A partir de deux résultats obtenus aux étapes 3 et 4, le dosage en ciment requis est de (168/0,517) kg/m³=324,95kg/m³.

6. ***Estimation de la quantité de gros granulat (gravier)***

En faisant l'interpolation dans le tableau [III-2] pour le module de finesse du granulat fin de 2,53, le volume du gros granulat compact à sec par unité de volume de béton est de 0,697 ; par conséquent, le poids sec du gros granulat (à l'état sec) est de 0,697*1553,35kg/m³=1082,68 kg/m³.

En effet, le poids sec du gros granulat (à l'état saturé surface sèche) a la même valeur que celle précédemment calculée car ces granulats n'absorbent pas, donc ils ne sont pas poreux.

7. ***Estimation de la teneur en granulat fin (sable)***

Etant donné que le poids et la masse volumique absolue de l'eau est connue, du ciment et du gros granulat et connaissant encore le volume de l'air emprisonné dans le mélange du béton, le volume par m³ occupé par différents éléments peut être calculé comme suit :

- Eau de gâchage : 168/1000=0,168m³
- Ciment : 324,95/ (1000*3,15)=0,103 m³
- Gros granulat (état sature surface sèche) : 1553,35/ (1000*2,706)=0,400 m³
- Air : 0,015 m³
- TOTAL=0,686 m³

Le volume que doit occuper 1 m³ de béton frais est de 1000 litres **[15].**

La différence du volume de 1000 litres avec le total ci-haut calculé nous donne le volume des granulats fins (sable).

Le volume que doit occuper les granulats fines équivaut à 1 m³-0,686 m³=0,314 m³.le poids du granulat fin à l'état sature surface sèche équivaut à : 0,314*2,606*1000=817,595kg/m³.

8. Ajustement de l'humidité des granulats :

Lors de l'étude de la composition du béton, il est indispensable de tenir en compte de la quantité de l'eau se trouvant à la surface des granulats .il émane que les granulats à l'état sec absorbent une certaine quantité de l'eau alors que les granulats à l'état saturé surface humide apportent une certaine quantité de l'eau de gâchage .Pour les teneurs en eau calculées, les poids ajustés des granulats sont donnés par les relations :

- Gravier (état sature surface humide) =poids état saturé surface humide*(100%+W-Abs)
- Sable (état sature surface humide)= poids état saturé surface humide*(100%+W-Abs)

Avec ces deux relations, les valeurs des poids ajustés sont telles que :

- Graviers (état sature surface humide) = 1082,68kg/m³*(100%+0,41% - 0,22%)=1087,1kg/m³
- Sable (état sature surface humide) : comme le teneur en eau et l'absorption pour les granulats fins sont de valeurs nulles, on a le poids égal à : 817,595kg/m³.

En effet la quantité de l'eau apportée par les gros granulats est de 0,41% tandis que les granulats fins n'apportent rien.

En vue de maintenir le rapport E/C constant, la quantité d'eau qu'il faut ajouter au mélange devient :

[168-(1082,68*0,41%)-(835,549*0,23%)] kg/m³=163,56kg/m³

Ou [168-(1087,12-1082,68)] = 163,56kg/m³

Ainsi, les poids récapitulés de la gâchée par m³ de béton deviennent :

Tableau III-3:Tableau récapitulatif des ingrédients par mètre cube de béton.

Désignation	Valeur	unité
eau	163,56	kg
ciment	324,95	kg
Gros granulats (graviers)	1087,12	kg
Granulats fins (sable)	817,595	kg
TOTAL	2393,23	kg

9. Préparation d'une gâchée d'essai

Selon la méthode ACI 318-08, une gâchée d'essai est nécessaire pour vérifier la classe de consistance prédéfinie ayant une grande influence sur la résistance du béton durci. Ainsi, la détermination du volume d'une gâchée d'essai est fait suivant le volume du cône d'Abrams qui est utilisé pour le slump test.

Méthodologie de composition d'une gâchée d'essai

La méthodologie pour la confection d'une gâchée d'essai est la suivante :

- ✓ Préparation des ingrédients suivant le volume adopté pour une gâchée ;
- ✓ Le mélange des ingrédients ;
- ✓ Vérification de la consistance ;
- ✓ Ajustement du mélange ;
- ✓ Remplissage de moules et vibration;
- ✓ décoffrage des spécimens et conservation sous l'eau ;
- ✓ écrasement des spécimens.

a. Préparations des ingrédients

Pour notre cas, le volume d'une gâchée d'essai est d'environ 0,0060 m³

Les poids d'une gâchée d'essai sont tels que :

- ♦ Eau de gâchage =0,981kg
- ♦ Ciment=1,950kg
- ♦ Gros granulat (état sature surface humide)=6,523kg
- ♦ Granulat fins (état sature surface humide)=4,906kg

b. Le mélange des ingrédients

Les composants sont d'abord mélangés à sec et l'eau est ajoutée en dernière position comme la montre la figure ci-contre :



Figure III.1: Mélange des ingrédients à sec.

c. Vérification de la consistance du béton

Une des méthodes les plus connues et les plus utilisées pour vérifier la consistance du béton est celle au cône d'Abrams qui mesure l'affaissement d'un béton compacté en trois couches avec 25 coups chacune comme on l'a décrit dans les chapitres précédents. Avec la quantité de l'eau ci-haut, on n'a observé aucun affaissement.

d. Ajustement du mélange

Cependant, il a été observé qu'il est obligatoirement nécessaire d'augmenter l'eau de 6 kg/m³ par mètre cube de béton pour obtenir un affaissement de 70mm ; donc un mélange plastique. En effet l'ajout d'une certaine quantité d'eau modifie la composition initiale du béton avec une augmentation du dosage en ciment .Les nouveaux poids des composants dans une gâchée d'un 1m³ pour une mise en œuvre aisée deviennent :

- ✓ Eau à ajouter au mélange =167,56kg/m³
- ✓ Ciment =336,56 kg/m³
- ✓ Gravier =1087,12 kg/m³
- ✓ Sable = 792,357 kg/m³

Pour une gâchée d'essai du volume énoncé ci-haut, les nouveaux composants deviennent :

- ✓ Eau : 1,017 kg
- ✓ Ciment : 2,019 kg
- ✓ Gravier : 6,523 kg
- ✓ Sable : 4,754 kg

On constate qu'avec ces nouveaux composants du spécimen, on obtient un affaissement escompté.

e. Remplissage des moules et vibration

Les moules utilisés sont de dimensions 10*10*10 cm ; avant de les remplir du béton malaxé, on fait un pré-mouillage pour que l'eau ne soit pas consommée par les planches.

Le remplissage des moules se fait en même temps que la vibration à la table vibrante d'une durée d'environ 45 secondes.



Figure III.2:Vibration des échantillons sur une table vibrante.

f. Décoffrage des spécimens et conservation sous l'eau

Le décoffrage des échantillons se fait après 24h et sont conservés sous l'eau pendant 28 jours pour qu'ils atteignent une résistance quasiment plus au moins maximale.



Figure III.3:conservation des spécimens sous l'eau pendant 28 jours.

CHAPITRE IV : LES RESULTATS D'ESSAI ET DISCUSSION

IV.1 Introduction

Le chapitre ci-présent synthétise tous les efforts fournis dans les autres chapitres précédents ; il concerne la réalisation des essais sur différentes éprouvettes qui ont 28 jours d'âges. En effet les essais sont réalisés sur des éprouvettes cubiques de dimensions 100*100mm qui sont soumises à la compression pour avoir l'idée de la résistance du béton ainsi testé. L'obtention des résultats est accompagnée d'une discussion afin de tirer les conclusions permettant de donner les recommandations aux futurs chercheurs.

IV.2 Les résultats de l'essai de compression

IV.2.1 Les résultats de l'essai de compression pour une gâcher d'essai

L'essai de compression est effectué sur les échantillons datant de 28 jours d'immersion dans l'eau ; les résultats d'écrasement des spécimens d'essais sont représentés dans le tableau [IV-1] ci-dessous :

Tableau IV-1:Tableau de résultats de l'essai de compression pour une gâcher d'essai

Echantillon	Force maximale en KN	Résistance à 28 jours en MPa
1	306,214	30,62
2	290,268	29,03
3	293,475	29,35

IV.2.2 Les résultats de compression des différentes éprouvettes

Six éprouvettes cubiques de dimensions énoncées dans l'introduction ont été confectionnées pour chaque série de béton .En effet il s'agit de quatre séries de béton suivant la provenance de l'eau utilisée dans leur confection, on distingue entre autre l'eau de robinet, l'eau de la rivière Ntahangwa en amont de **-3,378184° de latitude** et **29,398772° de longitude**; l'eau de Ntahangwa au milieu de **-3,363185° de latitude** et **29,367581° de longitude** et l'eau de Ntahangwa en aval de **-3,370844° de latitude** et **29,351051° de longitude** lesquelles nous permettent d'avoir ensemble 24 éprouvettes à tester comme le montre la figure [IV-1].



Figure IV.1:Les éprouvettes cubiques à tester

L'appareil utilisé pour l'essai de compression est tel que la figure le montre :

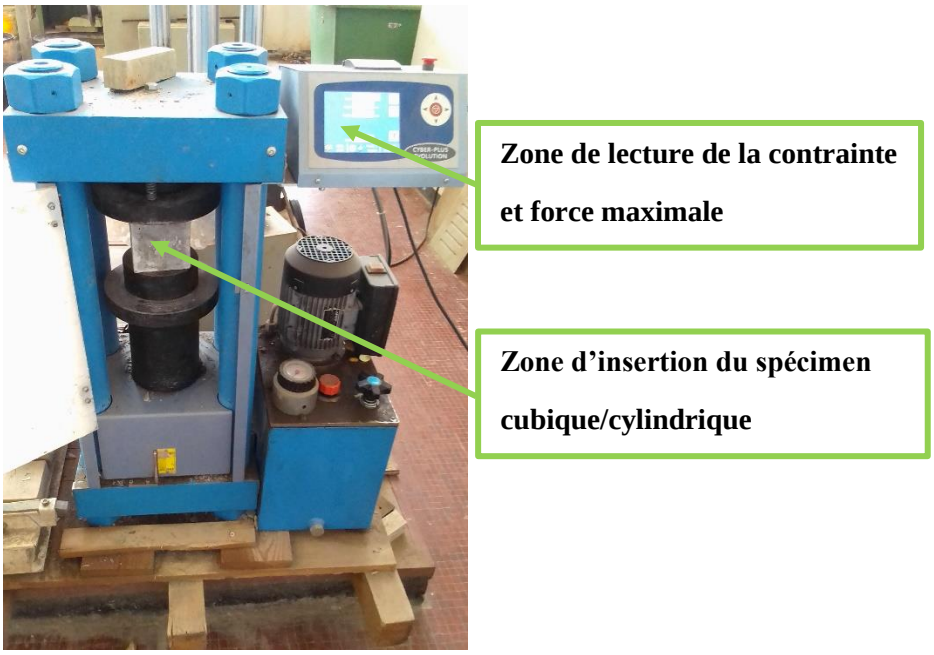


Figure IV.2:Machine de compression

La réalisation des essais de compression sur différentes éprouvettes nous donnent les résultats récapitulés dans les tableaux et par série.

Les spécimens de références sont ceux confectionnés avec de l'eau de robinet exemptée de toute sorte d'impureté.

Tableau IV-2:Résultats des essais de compressions sur les spécimens de références

	Force maximale en KN	Résistance maximale à 28jours en MPa
spécimen de référence	306,214	30,6
	290,268	29,0
	291,83	29,2
	277,266	27,3
	293,475	29,3
	280,03	28
La moyenne de six spécimens considérés		**28,79**

En effet, les résultats qui sont trouvés en Amont, au milieu et en Aval de la rivière Ntahangwa sont à comparer avec les résultats trouvés sur les spécimens de références ; ces résultats sont donnés dans une suite de tableaux ci-dessous :

Tableau IV-3: Résultats des essais de compressions sur les spécimens de l'Amont

	Force maximale en KN	Résistance maximale à 28jours en MPa
spécimen en Amont	266,8	26,7
	226,28	22,7
	264,131	26,4
	249,627	25
	227,187	23
	232,774	23,3
La moyenne de six spécimens considérés en Amont		**26,09**

Tableau IV-4: Résultats des essais de compressions sur les spécimens du milieu

	Force maximale en KN	Résistance maximale à 28jours en MPa
spécimen au milieu	235,23	23,52
	242,24	24,2
	218,86	21,89
	231,84	23,19
	198,21	19,82
	248,28	24,83
La moyenne de six spécimens considérés au milieu		**23,94**

Tableau IV-5: Résultats des essais de compressions sur les spécimens en Aval

	Force maximale en KN	Résistance maximale à 28jours en MPa
spécimen en Aval	200,63	20,00
	236,24	23,62
	230,31	23,03
	218,64	21,86
	163,34	16,33
	212,49	21,25
La moyenne de six spécimens considérés en Aval		**22,44**

IV.3 Analyse et discussion des résultats

Les résultats donnés par les essais de compression des différentes éprouvettes confectionnées avec les eaux provenant dans différents points de la rivière Ntahangwa montrent que les résistances des bétons à 28 jours diminuent graduellement au fur et à mesure qu'on s'éloigne de l'amont vers l'aval. L'impact est remarquable sur tous les échantillons confectionnés avec l'eau de Ntahangwa. Les diminutions des résistances en amont, au milieu et en aval sont respectivement dans les marges de 9,6%; 16,9% et 22,1%.

- ***Pourquoi alors cette diminution de la résistance?***

Cette question de savoir pourquoi la résistance du béton a diminué alors que on est dans une même rivière, n'importe quel individu peut avoir cette ambiguïté ; la chute de la résistance trouve origine dans le fait que la susceptibilité de pollution augmente de l'Amont vers l'Aval ce qui fait que les résistances remarquées sur les spécimens confectionnés avec de l'eau de l'aval sont grandement médiocre par rapport à celles trouvées en amont et aussi celles trouvées en Amont inférieures à des résistances trouvées sur les spécimens de références ce qui permet de dire sans équivoque que l'eau de Ntahangwa contient certaines substances provoquant une cette chute remarquable de la résistance.

- ***L'influence de la présence des substances chimiques dans l'eau de Ntahangwa sur la résistance?***

Les éléments chimiques tels que les sulfates, les chlorures et le pH sont ceux qui ont été analysés dans l'eau utilisée dans le gâchage du béton ; le tableau III-10 donne les valeurs ainsi trouvées qu'il faut comparer avec les valeurs seuils préconisées par les normes ISO 4316 et P18-303.

La comparaison de ces valeurs permet d'affirmer que les concentrations de ces différents éléments dans l'eau de gâchage pourraient avoir une influence négligeable sur la résistance du béton.

Néanmoins, ces concentrations auraient une influence sur la durabilité du béton et comme la notion de durabilité est très complexe, elle pourrait être étudiée sur des longues périodes ; Donc il nous serait très difficile de prédire sur base de nos résultats les conséquences de leur présence dans une période n'excédant pas six mois sauf celles que stipule la littérature disponible sur l'eau de gâchage.

Ainsi l'écart entre la durée de prélèvement de l'eau de la rivière Ntahangwa analysée au laboratoire du Centre de Recherche en Sciences Naturelles et de l'Environnement (CRSNE) dans la Faculté de sciences à Mutanga et l'eau utilisée dans le gâchage pourrait aussi justifier la chute de la résistance remarquée dans les résultats présentés.

L'élément principal justifiant la chute de la résistance pour le cas des éprouvettes faites par les eaux de la rivière Ntahangwa prélevées dans différentes localités est la présence des éléments retardateurs de prise dans l'eau de gâchage ; le tableau [II-12] montre l'écart entre les différents temps de prise sur l'essai réalisé avec ces eaux provenant de la rivière Ntahangwa en différents points.

En date du 5 juillet 2022, les échantillons ont été prélevés dans deux points de la rivière Ntahangwa et en date du 18 mars 2023 l'eau de gâchage a été prélevée sur trois points de la rivière géo-localisés par les coordonnées géographiques.

Il est donc compréhensible que l'eau analysée a été prélevée en saison sèche pendant laquelle il n'y a pas l'apport des matières organiques provenant des montagnes tandis que en Mars saison pluvieuse, il y a apport des matières organiques en provenance des montagnes et d'autres éléments chimiques provenant de ces dernières.

En effet, des éléments comme le zinc, les détergents, les sucres sont quelques-uns qui une fois présents dans l'eau de gâchage peuvent retarder la prise ce qui amoindrit la résistance ; ce sont ces éléments dont leur présence dans l'eau qui a utilisée est suspectée.

On représente les résultats sous forme des courbes dans le but de faciliter la compréhension par le lecteur de cet ouvrage.

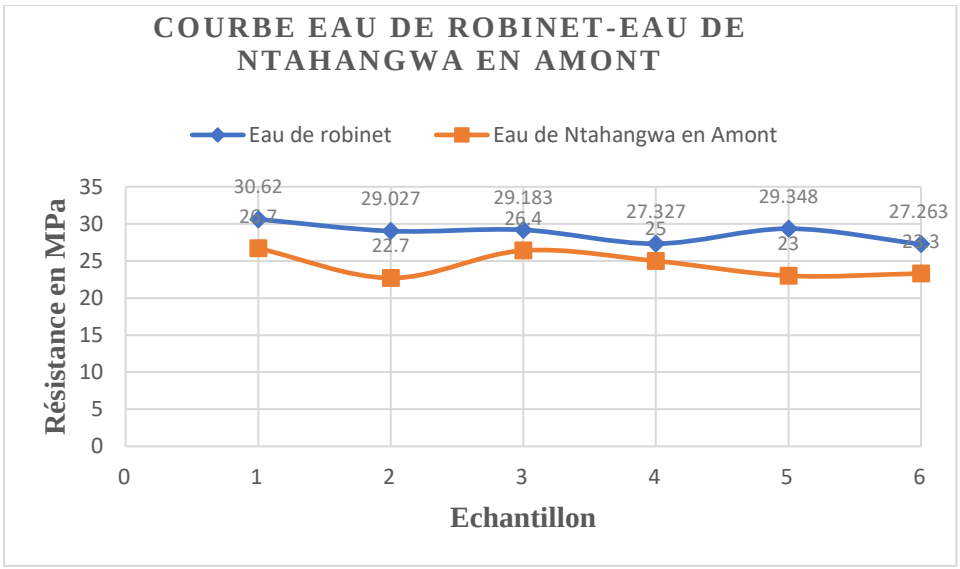


Figure IV.3: comparaison de la résistance trouvée avec l'eau de robinet et la résistance sur l'eau de la rivière Ntahangwa en Amont.

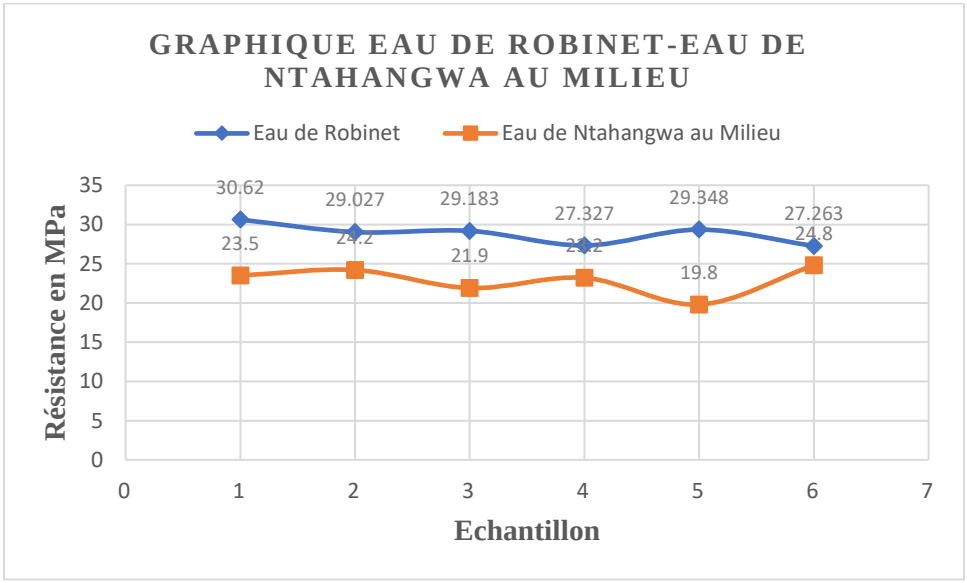


Figure IV.4: comparaison de la résistance trouvée avec l'eau de robinet et la résistance sur l'eau de la rivière Ntahangwa au milieu.

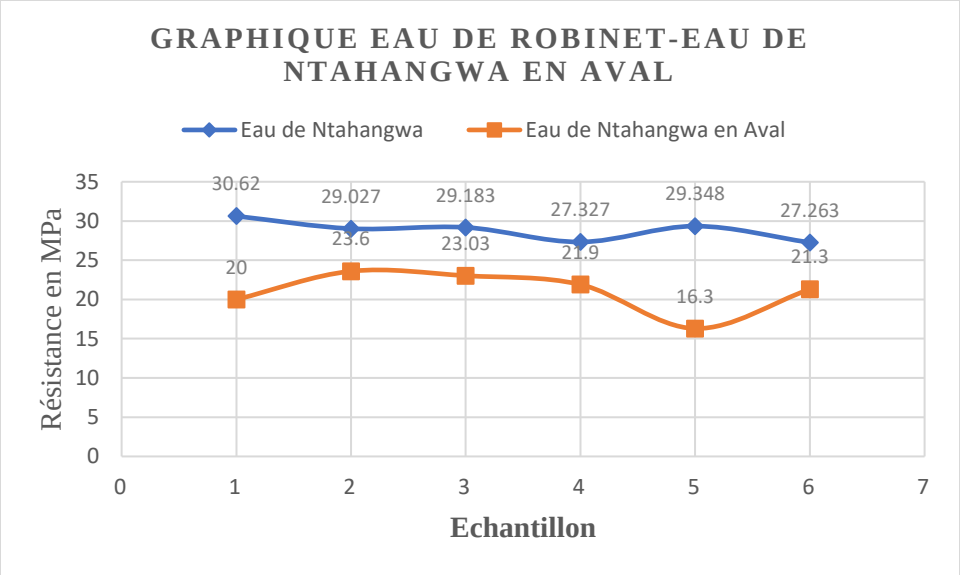


Figure IV.5: comparaison de la résistance trouvée avec l'eau de robinet et la résistance sur l'eau de la rivière Ntahangwa en Aval.

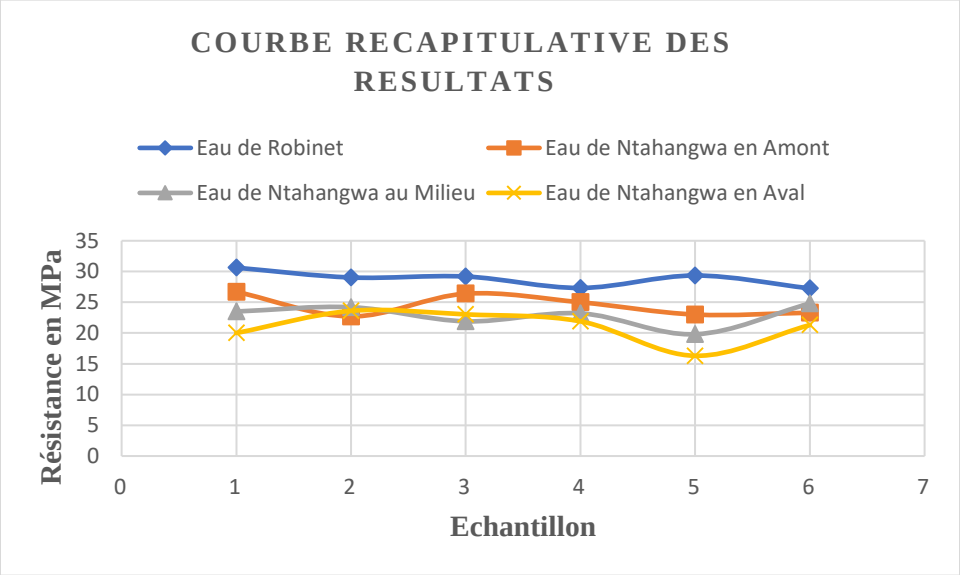


Figure IV.6: comparaison de la résistance trouvée avec l'eau de robinet et les résistances sur différentes points de la rivière Ntahangwa.

CONCLUSION GENERALE

D'une manière générale, l'objectif de notre travail est l'étude de l'impact de la qualité de l'eau de la rivière Ntahangwa sur le comportement physique et mécanique du béton.

Etant donné que beaucoup des gens qui construisent leurs bâtiments tout près des rivières et utilisent leurs eaux pour confectionner le béton qui est donc la problématique principale qu'on rencontre dans la vie quotidienne des constructeurs, cela relève beaucoup de questions dont notre étude apporte des éclaircissements. La technique qui a été adoptée pour la conception du mélange de béton dans le but de répondre à une multitude de questions que les gens se posent est celle de la méthode ACI (American Concrete Institute) développée par les Américains, ainsi des analyses chimiques pour l'eau de la rivière Ntahangwa utilisée pour le gâchage ont été effectuées. L'eau utilisée a été prélevée dans trois points différents dont les échantillons confectionnés avec cette dernière donnent des résistances à comparer avec les résistances trouvées avec les spécimens de références.

Les résultats de l'étude montrent que l'eau de Ntahangwa contient des ions sulfates, les ions chlorures et le pH en faible concentration par rapport à celles que les normes préconisent ce qui fait que l'eau de Ntahangwa n'est pas à craindre chimiquement; aussi l'étude montre que la résistance trouvée sur les éprouvettes confectionnées avec l'eau prélevée sur différents points de la rivière Ntahangwa diminuent graduellement de l'amont vers l'aval et présentant des résistances médiocres par rapport au béton que l'on désire avoir à l'âge de 28 jours de cure du fait de la présence des éléments retardateurs de prise [tableau II-12] dans l'eau de gâchage provenant de la rivière Ntahangwa.

L'eau de Ntahangwa a un impact de la diminution de la résistance enregistrée en amont de la rivière Ntahangwa de 9,6%, au milieu 16,9% et 22% en aval par rapport à la résistance moyenne trouvée sur les spécimens de références.

RECOMMANDATIONS

- Aux entreprises de constructions ou toute personne responsable de la construction :
- ✓ En cas de l'utilisation de l'eau de la rivière Ntahangwa, les études approfondies sont recommandées afin de prendre des décisions nécessaire pour améliorer la résistance ;
- Aux maitres d'ouvrages :

Suivre les conseils donnés par les experts du domaine.

- Au Gouvernement :

Financer et vulgariser les travaux de recherche faits au sein de l'Université.

- Aux futurs chercheurs à continuer les recherches sur ce sujet pour connaitre réellement la cause de la chute de la résistance en incluant l'analyse de la présence des matières organiques, la présence des détergents et du zinc dont leur présence dans l'eau de Ntahangwa a un impact négatif sur la résistance agissant comme des retardateurs de prise du béton.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. Steven H. Kosmatka and Michelle L. Wilson, «Design and control of concrete mixtures" Fifteenth Edition, USA, 2011.
2. Concrete: P Kumar Mehta & Paulo J.M Monteiro "Microstructures, properties and materials", Third edition, McGraw-Hill, 2006.
3. Georges DREUX, Jean FESTA, « Nouveau guide du béton et de ses constituants », Edition Eyrolles, 1998.
4. François Toutlemonde & Jacques Resplendino Wiley, CIMbéton [tome II], Les bétons : Formulation, Fabrication et mise en œuvre, Amprincipe Paris, 2013.
5. Guide Pratique : Holcim S.A, « Concevoir et mettre en œuvre les bétons durables », 2ème Edition, (Belgique), 2018.
6. M.VENUAT: Ciments et Bétons, 2ème Edition, Presses universitaires de France, Paris, 1973.
7. J.C DOUBRERE: Pratique du Béton Armé, 7ème Edition, Eyrolles, 1985.
8. M. PAPADAKIS & M.VENUAT, Les industries : Leurs productions, Leurs nuisances, DUNOD, 1970.
9. NF EN 12390-1, Partie 1 : Forme, dimensions et autres exigences relatives aux éprouvettes et aux moules.
10. Jacques Baron & Jean-Pierre OLLIVIER, « La durabilité des bétons », Paris, 1992.
11. Article: Mikerego E., Ndikumana J., "Concrete as a factor in reinforced concrete building collapse in Burundi", University of Burundi, 2022.
12. Article: Chérif BISHWEKA BIRYONDEKE, François NGAPGUE & Grace OLEMBE MUSANGI, "Study of water absorption coefficient of Goma's volcanic aggregates and its influence in formulating concrete", RD Congo, 2016.
13. Article: David Conciatori, Hamid Sadouki, Eugen Brühwiler, "Capillary suction and diffusion model for ingress into concrete", Lausanne, Switzerland, 2008.
14. Article: A. NACERI, « Etude comparative de méthodes de formulation du béton », Université de M'sila, Algérie, 2004.
15. Article: A. NACERI, « Influence de la configuration géométrique d'éprouvette sur la réponse mécanique du béton à la compression », Centre Universitaire de M'sila, Algérie, 2002.

16. Article: Yang. C.C & J.K Su ,Approximate migration coefficient of interfacial transition zone and the effect of aggregate content on the migration of mortar" , University of California, 2002.
17. Article: B. Redjel, W. K helifi & R. Jauberthie « Influence des méthodes destructives (écrasement) et non destructive (ultrason) et des géométries des corps d'épreuves », Université Badji Mokhtar de Annaba, Algérie, 2014.
18. Article: Wanda KOKOSZKA, Impact of water quality on concrete mix and hardened concrete parameters, Rzeszow University of Technology, Rzeszów, Poland, 2019.
19. Thèse Doctorale: Gérard ROQUIER, « Etude de la compacité optimale des mélanges granulaires binaires : classes granulaires, effet de paroi, effet de desserrement », Université PARIS-EST, 2016.
20. Thèse Doctorale : Mickaël SAILLIO, « Intéractions physiques et chimiques ions-matrice dans les bétons sains et carbonates. Influence sur le transport ionique », Université PARIS-EST-MARNE-LA-VALEE, 2012.
21. Ulrich TRÙB, « Les surfaces de béton », Edition Eyrolles, 1976, boulevard Saint-Germain, Paris V^{e}.
22. Mediani S, Rajela A, Hartawan M F S and Fartawijaya A 2017 Experimental study of the use of variations in water ph in normal concrete compressive strength f'c 25 MPa *3rd National* Seminar on Infrastructure Development Strategy (SPI-3) (Sumatera: Padang Institute of Technology).
23. Norme NF P 18-406, Bétons - Essai de compression, 1981.
24. Norme NF P 18-555, Granulats - Mesures des masses volumiques, Coefficient d'absorption et teneur en eau des sables, 1990.
25. EN 12390-1 :"Essai pour le béton durci- Partie 1 : Forme, Dimensions et autres exigences relatives aux éprouvettes et aux moules.
26. EN 12390-2 : "Essai pour le béton durci-Partie 2 : Confection et conservation des éprouvettes pour les essais de résistance »
27. EN 12390-3 : "Essai pour le béton durci- Partie 3 **:** Résistance à la compression des éprouvettes.

ANNEXE

Centre de Recherche en Sciences Naturelles et de l'Environnement
CRSNE

UNIVERSITE DU BURUNDI

FACULTE DES SCIENCES

RESULTATS D'ANALYSE DES ECHANTILLONS DE L'EAU DE LA RIVIERE NTAHANGWA FOURNIS PAR JOHNSSON / FSI

Paramètres	Site 1	Site 2
pH	5.66	6.54
$SO4^{2-}$ (mg/L)	0.123	0.968
Cl^- (mg/l)	90.88	89.81

Fait à Bujumbura, le 07/07/2022

Le Chef du Département de Chimie

Dr Pierre Claver MPAWENAYO

UNIVERSITE DU BURUNDI
FACULTE DES SCIENCES
Bujumbura
Département de Chimie

Figure 0.1:Resultats d'analyse des échantillons de l'eau de la rivière Ntahangwa en Mairie de Bujumbura.