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

Effet de la remontée des eaux sur les structures en béton:Cas des quartiers Industriel, Kajaga et Miroir

MWUHIZI, Gaël Hugues

2021-10
UB
https://repository.ub.edu.bi/handle/123456789/276

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

UNIVERSITE DU BURUNDI

FACULTE DES SCIENCES DE L'INGENIEUR

Département de Génie Civil

Effet de la remontée des eaux sur les structures en béton:

Cas des quartiers Industriel, Kajaga et Miroir

Par

Gaël Hugues MWUHIZI

MÉMOIRE

présenté en vue d'obtenir

Le grade de Maitre en Sciences de l'Ingénieur

PARCOURS : Génie Civil

OPTION : Génie civil, Aménagement et Maitrise des projets

Sous la direction de : **Dr Ir Daniel HATUNGIMANA (directeur)**

Bujumbura, Octobre 2021

UNIVERSITE DU BURUNDI

FACULTE DES SCIENCES DE L'INGENIEUR

Département de Génie Civil

Effet de la remontée des eaux sur les structures en béton:

Cas des quartiers Industriel, Kajaga et Miroir

Par

Gaël Hugues MWUHIZI

MÉMOIRE

présenté en vue d'obtenir

Le grade de Maitre en Sciences de l'Ingénieur

PARCOURS : Génie Civil

OPTION : Génie civil, Aménagement et Maitrise des projets

Sous la direction de : **Dr Ir Daniel HATUNGIMANA (directeur)**

Bujumbura, Octobre 2021

COMPOSITION DU JURY

- Dr Ir Jean Pierre MASEKANYA : Président
- Dr Ir Daniel HATUNGIMANA : Directeur
- Dr Ir Josias BIZINDAVYI : Lecteur principal
- Dr Ir Paul NIBASUMBA : Membre

Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

- A mes parents pour leur soutien sans faille durant toute la durée de ma formation,
- A toute ma famille, mes frères, mes sœurs,
- A tous les enseignants du département de génie civil de l'université du Burundi,
- A tous ceux qui m'ont aidé de loin ou de près.

Remerciements

Au terme de ce travail, je tiens à remercier en premier lieu le Tout-Puissant, Miséricordieux qui m'a donné la force et la patience pour achever ce mémoire.

J'adresse ma profonde et respectueuse gratitude à Monsieur Dr Ir Daniel HATUNGIMANA qui a dirigé attentivement et efficacement l'évolution de ce travail.

A tout le personnel du laboratoire des matériaux de l'université du Burundi (campus Kiriri).

Enfin, que tous les enseignants qui ont contribué à ma formation trouvent ici ma profonde reconnaissance.

RESUME

Le développement économique est synonyme de développement industriel et agricole. Bien que nécessaire, il doit être accompagné de mesures d'accompagnement comme des réseaux d'assainissement et centres d'épuration des eaux provenant des sites industriels et agricoles.

Au Burundi, particulièrement à Bujumbura, les industries ont été établies avant la construction des réseaux suffisants de collecte et de traitement des eaux usées. Ceci a eu pour conséquence une pollution des eaux du lac, affluents du lac, des eaux de surface et de la nappe. En plus de la pollution, s'ajoute des inondations répétitives qui occupent les zones habitées pendant de longues périodes.

L'objectif principal de ce mémoire s'inscrit dans le cadre d'une étude de l'impact de ces eaux sur les structures en béton ainsi que la classification, des sites de prélèvement de ces dernières en fonction de leurs degrés d'agressivité vis-à-vis du béton.

Comme démarche méthodologique, elle a été subdivisée en trois grandes parties :

- Une délimitation des zones d'études (Quartiers Kajaga, Miroir et Industriel),
- Une analyse chimique des eaux prélevées sur ces sites (présence d'ions susceptibles d'attaquer le béton ainsi que les concentrations de ces dernières),
- Confection et submersion des éprouvettes en béton dans ces eaux pour évaluer le développement de la résistance à la compression au fil des jours (à 7, 28 et 60 jours).

Les résultats obtenus, par analyse chimique, nous ont montré que les eaux du quartier Miroir ont un pH acide et des concentrations ioniques élevées, comparées à celles des deux autres quartiers. De même que l'évaluation de la résistance à la compression, aucun des éprouvettes ayant subi une maturation dans les eaux prélevées sur les 3 sites n'a atteint la résistance moyenne à la compression à 28 jours des bétons de référence considérées (B30, B40).Nous avons observé également une régression de 2 à 3 classes de résistance à 60 jours. Le béton B40 semble cependant le plus adapté à résister à ces eaux grâce à une diminution de résistance pas assez importante et une maturation rapide même après 28 jours.

L'étude aura pour répercussion :

- La prise de conscience de l'agressivité des eaux stagnantes, de la nappe et du lac sur le béton,
- La classification des zones d'étude en fonction de leur degré d'agressivité vis-à-vis du béton,
- L'obtention des dispositifs de construction à prendre en compte lors du dimensionnement des infrastructures futures dans ces zones.

Mots clés : Résistance à la compression du béton, Remontée des eaux, Dégradations chimiques, Analyse chimique de l'eau, Pollution.

ABSTRACT

Economic development is synonymous with industrial and agricultural development. Although necessary, it must be accompanied by accompanying measures such as sewerage networks and treatment centers for water from industrial and agricultural sites.

In Burundi, particularly in Bujumbura, industries were established prior to the construction of adequate wastewater collection and treatment networks. This resulted in pollution of the lake's waters, tributaries of the lake, surface water and groundwater. In addition to pollution, there are also repeated floods that occupy inhabited areas for long periods of time.

The main objective of this thesis is part of a study of the impact of these waters on concrete structures as well as the classification of the sampling sites of the latter according to their degrees of aggressiveness to concrete.

As a methodological approach, it has been subdivided into three main parts:

- A delimitation of the study areas (Kajaga District, Mirroir District, Industrial District),
- A chemical analysis of the water taken from these sites (presence of ions likely to attack the concrete as well as the concentrations of the latter),
- Manufacture and submersion of concrete specimens in these waters to evaluate the development of compressive strength over the days (at 7 days, at 28 days and at 60 days).

The results obtained, by chemical analysis, showed us that the waters of the Miroir district have an acidic pH and high ionic concentrations, compared to those of the other two districts. As well as the evaluation of compressive strength, none of the specimens having undergone maturation in the water collected from the 3 sites did not reach the average resistance to compression at 28 days of the considered reference concrete (B30 and B40). We observe also a regression from 2 to 3 resistance classes at 60 days. However, the concrete B40 seems the most suitable to resist these waters due to the no important decrease of resistance and to the fast maturation even after 28 days.

The impact of the study will be:

- Awareness of the aggressiveness of stagnant water, groundwater and lake on concrete,
- The classification of study areas according to their degree of aggressiveness to concrete,
- Obtaining the construction devices to be taken into account when sizing future infrastructures in these areas.

Key words: Compressive strength of concrete, Water rise, Chemical degradations, Chemical analysis of water, Pollution.

Table des matières

Composition du jury……...……..……i

Dédicace……...……ii

Remerciements…….……iii

Résumé……...……..iv

Abstract……...……..v

Table des matières……...……vi

Liste des tableaux……...…..….viii

Liste des figures……...ix

Liste des sigles et abréviations……...…..….x

Liste des normes……...xi

Avant-propos……...…xii

I. Introduction…….…….……..…….....1
I.1. Description des sites d'étude……...……..…….....1
I.2. Etat des lieux actuels…….…….…….....……..3
II. Revue de la littérature…….……...……5
II.1. Facteurs de dégradations du béton……...…..…...6
II.1.1. Mécanismes de corrosion des armatures en acier dans le béton……....……6
II.1.2. Action des eaux agressives…….……7
II.1.3. Mécanismes développés par le gel et les sels de déverglace……...……..….8
II.1.4. Les phénomènes d'alcali-réaction……...…….……..…..8
II.1.5. Actions de l'eau de mer sur le béton……..……...…….9
II.1.6. Phénomènes de gonflement interne sulfatique……..……...10
II.2. Origines de la remontée des eaux……..…..……..10
II.3. Hypothèses sur les origines de l'agressivité des eaux……....…….……11
III. Matériel et méthodes…….……...13
III.1. Identification des matériaux…….……...14
III.1.1. L'eau de gâchage……14
III.1.2. Les granulats……..……..15
III.2. Etude des paramètres variables de l'étude……..... 18
III.2.1. L'eau de maturation…….……18
III.2.1.1. Protocole de mise en évidence des ions sulfate……..…….……19

III.2.1.2. Protocole de mise en évidence des ions chlorure……..…22
III.2.1.3. Protocole de mise en évidence des ions ammonium…..……..…….24
III.2.2. Le béton…….……..…28
III.2.2.1. Analyse granulométrique…….…….30
III.2.2.2. Formulation du béton…….…...…32
III.2.2.2.1. Dosage des granulats……...…..…….....32
III.2.2.2.2. Dosage de tous les constituants du béton B30…….……..36
III.2.2.2.3. Dosage de tous les constituants du béton B40…….……..38
IV. Résultats et discussion…….41
V. Conclusion et Recommandations……..…….....49
Références bibliographiques……51
Annexe…….52

Liste des tableaux	
Tableau 1 : Normes de potabilité (Analyse physico chimique)	14
Tableau 2 : Normes de potabilité (Analyse minéralogiques)	15
Tableau 3 : Résultats de l'essai masse volumique apparente du sable	16
Tableau 4 : Résultats de l'essai masse volumique absolue du sable	17
Tableau 5 : Résultats de l'essai masse volumique apparente du gravier	17
Tableau 6 : Résultats de l'essai masse volumique absolue du gravier	18
Tableau 7 : Composition des tubes numérotés pour établissement de la courbe d'étalonnage	20
Tableau 8 : Absorbance des solutions pour établissement de la courbe d'étalonnage (sulfates)	20
Tableau 9 : Pente et ordonnée à l'origine pour la courbe d'étalonnage des sulfates	21
Tableau 10 : Absorbance des eaux prélevées (à longueur d'onde de 650 nm)	21
Tableau 11 : Absorbance des eaux prélevées	26
Tableau 12 : Absorbance des solutions pour établissement de la courbe d'étalonnage (NH4)	26
Tableau 13 : Pente et ordonnée à l'origine de la courbe d'étalonnage (ammonium)	27
Tableau 14 : Résultats des analyses chimiques (**Annexe 2)**	27
Tableau 15 : Résultats de tamisage du gravier	30
Tableau 16 : Résultats de tamisage du sable	31
Tableau 17 : Valeurs du terme correcteur K	33
Tableau 18 : Coefficient granulaire G	36
Tableau 19 : Correction sur le dosage en eau en fonction de D	37
Tableau 20 : Valeur du coefficient de compacité	37
Tableau 21 : Dosage des constituants du béton B30	38
Tableau 22 : Dosage des constituants du béton B40	40
Tableau 23 : Résultat d'essais en compression pour le béton B30 (Kajaga)	41
Tableau 24. : Résultat d'essais en compression pour le béton B30 (Miroir)	41
Tableau 25 : Résultat d'essais en compression pour le béton B30 (Industriel)	41
Tableau 26 : Résultat d'essais en compression pour le béton B30 (Témoin)	42
Tableau 27 : Régression de classe de résistance à 60 jours (B30)	42
Tableau 28 : Comparaison en % des résultats en fonction des éprouvettes témoins (B30)	43
Tableau 29 : Réduction en pourcentage par rapport au béton de référence (B30)	44
Tableau 30 : Résultat d'essais en compression pour le béton B40 (Kajaga)	44
Tableau 31 : Résultat d'essais en compression pour le béton B40 (Miroir)	45
Tableau 32 : Résultat d'essais en compression pour le béton B40 (Industriel)	45
Tableau 33. Résultat d'essais en compression pour le béton B40 (Témoin)	45
Tableau 34 : Régression de classe de résistance à 60 jours (B40)	46
Tableau 35 : Comparaison en % des résultats en fonction des éprouvettes témoins (B40)	46
Tableau 36 : Réduction en pourcentage par rapport au béton de référence (B40)	48

Liste des figures	
Fig.1. Vue aérienne du quartier Kajaga	2
Fig.2.Vue aérienne du quartier Miroir	2
Fig.3.Vue aérienne d'une partie du quartier industriel	3
Fig.4. Parcelles inondées dans le quartier Kajaga	3
Fig.5. Structures présentant une forte attaque chimique dans le quartier Kajaga	4
Fig.6. Parcelles inondées dans le quartier industriel	4
Fig.7. Débordement d'un réseau de canalisation	11
Fig.8. Machine Matest de compression du béton	14
Fig.9. Essai masse volumique du sable	15
Fig.10. Essai de la masse volumique absolue	16
Fig.11. Cure des éprouvettes dans l'une des eaux prélevées	18
Fig.12. Mesure du pH in situ	19
Fig.13. Courbe d'étalonnage (sulfates)	21
Fig.14. Pastilles DPD 1	22
Fig.15. Pastille écrasée dans un tube	23
Fig.16. Coloration rosâtre de l'eau (présence des ions chlorures)	23
Fig.17. Lecture sur photomètre	24
Fig.18. Coloration jaunâtre de l'échantillon (présence d'ions ammonium)	25
Fig.19. Tube pour spectrophotomètre	25
Fig.20. Spectrophotomètre	26
Fig.21. Courbe d'étalonnage (ammonium)	27
Fig.22. Granulats utilisées pour l'analyse granulométrique	29
Fig.23. Etuve	29
Fig.24. Tamis pour analyse granulométrique	30
Fig.25. Courbes granulométriques des granulats	31
Fig.26. Tracé de la courbe granulaire OAB	33
Fig.27. Tracé des droites horizontales passant à 5% et à 95% des tamisâts	34
Fig.28. Tracé de la droite D	35
Fig.29. Tracé de la droite verticale de détermination des pourcentages sable/ciment	35
Fig.30. Courbe fc,cube en fonction du temps (B30)	42
Fig.31. Comparaison graphique des résultats en fonction des éprouvettes témoins (1) (B30)	43
Fig.32. Comparaison graphique des résultats en fonction des éprouvettes témoins (2) (B30)	43
Fig.33. Courbe fc,cube en fonction du temps (B40)	46
Fig.34. Comparaison graphique des résultats en fonction des éprouvettes témoins (1) (B40)	47
Fig.35. Comparaison graphique des résultats en fonction des éprouvettes témoins (2)	47

Liste des sigles et abréviations

1	Centre d'information sur le ciment et ses applications	CIM béton
2	Centre Scientifique et Technique de la Construction	CSTC
3	Potentiel hydrogène	pH
4	Volume du récipient	Vol. récipient
5	Masse de la moule	M_{moule}
6	Masse totale	M_t
7	Masse volumique apparente	ρ_{app}
8	Masse volumique absolue	ρ_{abs}
9	Dimension du gros granulat	Dmax
10	Rapport ciment sur eau	C/E
11	Module de finesse	M_f
12	Résistance à la compression à 28 jours	f_{c28}
13	Dosage en eau	E
14	Dosage en eau corrigée	E_C
15	Résultat brut	R
16	Résultat d'essai en compression	fc,cube
17	Classe d'exposition pour environnement chimique faiblement agressif	XA1
18	Classe d'exposition pour environnement chimique moyennement agressif	XA2
19	Classe d'exposition pour environnement chimique fortement agressif	XA3

Liste des normes

EN P 18-558 : Essai masse volumique absolue des fines.

P 18-560 : Analyse granulométrique par tamisage.

EN 18-554 : Masse volumique apparente (sable).

EN 18-301 : Masse volumique absolue (sable).

EN 13139 : Module de finesse.

NF EN 12620 : Masse volumique apparente (gravier).

NF EN 12620 : Masse volumique absolue (gravier).

EN 12390-4 : Résistance à la compression.

SN EN 206 : Valeurs limites pour les classes d'exposition.

NF EN 206-1 : Détermination de fc (résultat d'essai en compression) à partir de R (résultat brut)

Avant-propos

Les structures en béton constituent une place importante dans notre environnement car ils nous fournissent un habitat, une source de protection contre les intempéries, permettent une communication rapide entre les communautés (routes)...Etc.

Nous apprécions aussi le béton pour ces nombreuses qualités dont le faible coût, une bonne résistance, la facilite d'entretien et nous l'apprécions moins lorsqu'ils se dégradent et causent des dégâts.

Comme ingénieur, nous sommes donc appelés à observer et à tenir compte des causes de dégradations du béton.

L'étude des dégradations du béton commence d'abord par l'identification des substances ou agents agressifs susceptibles d'attaquer le béton, ensuite à la formulation, selon les règles de l'art, des spécimens en béton.

Le but de ce travail sera donc de tirer la sonnette d'alarme en montrant, par analyse chimique, la composition des eaux des milieux d'étude, l'effet de ces eaux sur la résistance mécanique du béton et bien sûr fournir des dispositifs de construction à prendre en compte pour les constructions futures.

Bujumbura, Octobre 2021

I. INTRODUCTION

Depuis plusieurs années, il a été observé un dérèglement du climat causé par le réchauffement climatique. Ce dérèglement s'observe principalement, dans la région tropicale, par des saisons sèches longues et des saisons pluvieuses ravageuses par leur forte précipitation.

A ce phénomène naturel s'ajoutent les actions humaines qui peuvent amplifiées ces effets (les constructions, la déforestation… etc.)

A Bujumbura, principalement sur les terrains humides marécageux (Quartier Kajaga, Quartier Miroir, Quartier industriel), les effets de ce dérèglement ne sont pas à négliger.

En effet, malgré les chaleurs torrides de la saison sèche, certaines parties de ces sites ne dégorgent pas d'eau et cela tout au long de l'année, fragilisant les habitations.

Dans le présent travail, il a été objet d'analyser la composition et la concentration ionique de ces eaux ainsi que leurs effets sur la résistance des structures en béton.

La connaissance de ces trois éléments permettra d'avoir une idée sur la classe d'agressivité de ces eaux afin d'obtenir les dispositifs de construction sur les ouvrages futurs.

Comme méthodologie, il y a eu confection des éprouvettes ($10\times10\times10$ cm^3) de béton de classe différente (B30 et B40), suivie d'une submersion de ces dernières dans les eaux prélevées sur les trois sites d'étude. La résistance à la compression étant évaluée sur 7 jours, 28 jours, 60 jours afin d'être comparée à celle d'autres éprouvettes plongées dans de l'eau propre.

L'analyse chimique a été faite par une mise en évidence des agents agressifs, c'est-à-dire les ions susceptibles d'attaquer le béton (les ions sulfates, ammoniums, chlorures). Cette mise en évidence s'est fait par utilisation de réactifs spécifiques à chaque ion, d'un certain mode opératoire et d'observations qui nous ont permis de juger de la présence d'ion quelconque.

I.1. Description des sites d'étude

Le quartier Kajaga est un quartier d'habitation, bordant le lac Tanganyika, qui se situe sur une altitude variant de 773 m à 777 m. Le lac Tanganyika étant sur une altitude actuelle de 772 m, le point le plus bas de ce quartier se situe à moins de 1 m au-dessus du niveau du lac. Ceci aura donc pour conséquence des inondations répétitives durant la saison pluvieuse.



***Fig.1**. Vue aérienne du quartier Kajaga*

Le quartier Miroir se situe sur une altitude un peu élevée par rapport au lac (778 m ~ 787 m). Etant située sur un sol argileux, ne possédant de viabilisation adéquate et une route principale goudronnée (route de l'aéroport) surélevée par rapport au niveau du quartier, tous ces éléments ont pour conséquence des inondations à cause principalement d'un manque d'infiltration dans le sol des eaux de pluie.



***Fig.2**. Vue aérienne du quartier Miroir*

Le quartier Industriel présente les mêmes caractéristiques que celui du quartier Kajaga. A cela s'ajoute une forte présence d'industrie sur moins de 50 m du lac et des installations de stockage des hydrocarbures.



***Fig.3**. Vue aérienne d'une partie du quartier industriel*

I.2. Etat des lieux actuels



***Fig.4**. Parcelles inondées dans le quartier Kajaga*



***Fig.5**. Structure présentant une forte attaque chimique dans le quartier Kajaga*



***Fig.6**. Parcelles inondées dans le quartier industriel*

II. REVUE DE LA LITTERATURE

Le béton est un matériau complexe car sa durabilité dépend de nombreux paramètres dont :

- La qualité de sa conception : c'est-à-dire un malaxage efficace adapté à la formulation, respect des tolérances sur ses constituants,
- La qualité des matériaux et des produits utilisés,
- La qualité des dispositions constructives, de la réalisation de l'ouvrage et de la mise en œuvre des produits,
- Les diverses conditions d'usage, d'exploitation et de maintenance.

Par qualité des matériaux, il faut sous-entendre l'identification de ses constituants :

- Les propriétés de l'eau de gâchage utilisée,
- Les propriétés du ciment,
- Les caractéristiques physiques des granulats fins,
- Les caractéristiques physiques et mécaniques des gros granulats.

La qualité des dispositions constructives et de la réalisation de l'ouvrage concerne une vibration correcte, une cure adaptée, une prise en compte des conditions climatiques lors du bétonnage, des retraits maîtrisés, un respect des valeurs d'enrobage des armatures, etc.)

La seule durabilité intrinsèque du béton ne suffit plus à garantir la durée de service de l'ouvrage. Prescrire un béton durable nécessite donc d'apprécier dès sa conception, l'ensemble des contraintes environnementales, des agressions et des attaques potentielles, qu'il aura à subir pendant toute sa durée de service. C'est donc pour cette raison que les diverses conditions d'usage, d'exploitation et de maintenance sont à tenir compte.

L'objet de cette étude sera basé sur le choix des milieux, jugés potentiellement agressifs, et sur l'observation des effets de ces derniers sur la résistance mécanique du béton.

Mais pour commencer, il faut l'énumération de ces facteurs principaux de dégradations du béton (CIM béton- Fiches techniques- Tome 3, Edition 2008) ainsi que les hypothèses qui pourraient affirmer la présence de ces derniers dans les milieux d'étude.

II.1. Facteurs de dégradation du béton

II.1.1. Les mécanismes de corrosion des armatures en acier dans le béton

Dans des conditions normales, les armatures enrobées d'un béton compact et non fissuré sont protégées naturellement des risques de corrosion par un phénomène de passivation qui résulte de la création, à la surface de l'acier, d'une pellicule protectrice $\mathbf{Fe_2\ O_3 CaO}$ (dite de passivation).
Cette pellicule est formée par l'action de la chaux libérée par les silicates de calcium sur l'oxyde de fer. La présence de chaux maintient la basicité du milieu entourant les armatures (l'hydratation du ciment produit une solution interstitielle basique de pH élevé de l'ordre de 12 à 13). Les armatures sont protégées tant qu'elles se trouvent dans un milieu présentant un pH compris entre 9 et 13,5.

Deux principaux phénomènes peuvent dans certaines conditions détruire cette protection et initier la corrosion des armatures en acier:

- **La carbonatation du béton** par le gaz carbonique de l'air (CO2) est un phénomène naturel qui n'est pas nocif pour le béton. Au cours de la prise et du durcissement, les ciments se combinent avec l'eau pour former des produits hydratés de caractère basique. Certains de ces produits [KOH, NaOH et Ca(OH)2] restent dissous dans la solution aqueuse interstitielle du béton (dont le pH est compris entre 12 et 13). Le gaz carbonique contenu dans l'air a tendance à se combiner avec les produits hydratés, en commençant par les bases alcalines dissoutes dans la solution aqueuse interstitielle, en particulier le Ca(OH)2, selon une réaction produisant du carbonate de calcium CaCO3:

$$Ca(OH)_2 + CO_2 + H_2O \rightarrow CaCO_3 + 2H_2O$$

  Le milieu basique (pH 12 à 13) se trouve progressivement modifié par la neutralisation de l'alcalinité du ciment pour atteindre un pH de l'ordre de 9, n'assurant plus la protection des armatures et entraînant une dépassivation de l'acier (destruction de la couche de passivation), ce qui développe une réaction d'oxydation à la surface des armatures.
  La progression de la carbonatation se fait de l'extérieur de l'ouvrage, en contact avec l'air ambiant, vers l'intérieur. Dans un premier temps, la vitesse de propagation est ralentie par la formation des carbonates qui colmatent partiellement la porosité. Elle diminue donc avec la profondeur atteinte. Dans un second temps, la carbonatation a pour conséquence une neutralisation (chute du pH de la solution interstitielle) du milieu de protection des armatures, qui peuvent alors s'oxyder. La cinétique du processus dépend de la teneur en dioxyde de carbone et de la facilité avec laquelle le gaz carbonique pénètre dans les pores du béton.
  La cinétique et la profondeur de carbonatation d'un béton sont donc fonction de sa composition, de sa structure poreuse, de la classe d'exposition et de l'humidité relative dans laquelle est situé l'ouvrage. Elle dépend aussi de la concentration en dioxyde de carbone et de la température de l'atmosphère environnant.

- **L'action des chlorures** est spécifique à certains environnements dans lesquels peut se trouver le béton comme les ouvrages soumis aux sels de déverglaçage ou situés en site maritime (zone de marnage, surfaces soumises aux embruns).
  La corrosion s'amorce dès que la teneur en chlorures au niveau des armatures atteint un certain seuil de dépassivation. Ce seuil est fonction du pH de la solution interstitielle et de la teneur en oxygène au niveau des armatures; il est de l'ordre de 0,4 à 0,5 % par rapport au poids du ciment. Il est atteint plus rapidement si le béton est carbonaté.

Les effets de la corrosion est que son développement peut provoquer par gonflement une poussée sur le béton d'enrobage (les oxydes de fer étant plus volumineux que l'acier, ils génèrent des contraintes internes dans le béton qui peuvent être supérieures à sa résistance en traction) et donc une altération de l'aspect extérieur de l'ouvrage (éclatements localisés, formations de fissures, formations d'épaufrures, apparitions en surface de traces de rouille et éventuellement mise à nu des armatures) entraînant une réduction de la section efficace de l'armature et de son adhérence au béton.

II.1.2. Action des eaux agressives

Un ouvrage peut être soumis à de multiples agressions engendrées par l'action des sels ou des gaz en solution dans l'eau (eaux souterraines, eaux de mer, pluie, etc.). Les eaux peuvent être chargées en sels minéraux les plus divers en fonction des sols traversés. Les milieux les plus agressifs sont soit acides, soit salins (chlorures, nitrates, et surtout sulfates de sodium, de calcium ou de magnésium).

L'agressivité des milieux dans lesquels peuvent se trouver les ouvrages en béton est liée à la présence d'eau et à l'aptitude de celle-ci à réagir avec certains minéraux de la matrice cimentaire du béton.

En effet, les agents agressifs dissous dans l'eau constituent une solution chimiquement agressive pour le béton qui peut provoquer plusieurs types de phénomènes lorsque la formulation du béton n'est pas optimisée.

Les principaux phénomènes sont :

- **Les attaques acides :** Le béton présente un caractère basique élevé induit par les composés hydratés de la pâte de ciment (la phase interstitielle contenue dans le béton a un pH très élevé). Il peut donc présenter une certaine réactivité vis-à-vis des solutions acides telles que les pluies acides, les eaux naturelles chargées en dioxyde de carbone, les eaux résiduaires, les eaux des industries agroalimentaires ou industrielles contenant des acides organiques, les eaux chargées en acides minéraux, mais aussi les eaux pures.
- **Lixiviation :** Dans une structure en béton exposée à l'air ambiant, l'eau ne s'évapore que sur une épaisseur limitée à quelques centimètres.

Les pores sont saturés lorsque le béton est en contact de manière prolongée avec l'eau. Des ions en provenance du milieu extérieur peuvent alors transiter, dans la phase liquide interstitielle du béton. En fonction de la nature des éléments chimiques qui pénètrent dans le matériau, il peut en résulter des réactions chimiques de dissolution/ précipitation et donc une lixiviation progressive des hydrates. Les eaux pures ou très peu chargées ont un grand pouvoir de dissolution, elles peuvent dissoudre les constituants calciques du béton (la portlandite notamment).

II.1.3. Les mécanismes développés par le gel et les sels de déverglaçage

Les mécanismes de dégradation du béton sont liés l'alternance de cycles répétés de phases de gel et de dégel. Le risque de désordres est d'autant plus élevé que le degré de saturation en eau du béton est important. C'est le cas notamment des parties d'ouvrages non protégées des intempéries et en contact direct avec des eaux saturées en sel. Une formulation mal adaptée et une mise en œuvre incorrecte du béton peuvent amplifier les dégradations.

Ce phénomène est aggravé, en surface, par l'application des sels de déverglaçage (ou fondants routiers), qui engendrent un accroissement des gradients de concentrations en sels, générant ainsi des pressions osmotiques plus élevées.

Les dégradations occasionnées par le gel peuvent être de deux types:

- une microfissuration répartie dans la masse du béton (feuilletage parallèle aux parois), provoquée par un mécanisme de gel interne;
- un délitage de la zone superficielle (dégradation superficielle), appelé écaillage, sous l'effet conjugué des cycles de gel-dégel et des sels de déverglaçage.

Un gradient thermique important au voisinage de la surface, générée par l'application des sels à titre curatif sur un film de glace, amplifie la dégradation de surface.

Ces deux formes de dégradation peuvent se produire simultanément ou de manière indépendante, elles peuvent affecter la durabilité de la structure et en particulier la pérennité architecturale des ouvrages.

II.1.4. Les phénomènes d'alcali-réaction

Le phénomène d'alcali-réaction résulte de l'action des alcalins solubles (oxyde de sodium Na_2O et oxyde de potassium K_2O) du béton sur une certaine forme de silice réactive, en présence d'eau. Il correspond à un ensemble de réactions chimiques complexes qui peuvent se déclencher entre certaines phases minérales contenues dans les granulats et la solution interstitielle fortement basique du béton, lorsque plusieurs conditions sont réunies simultanément: présence d'une forme de silice des granulats dite « potentiellement réactive », des alcalins du béton et de l'eau en quantité suffisante.

Des travaux de recherche importants ont été engagés en France dès le début des années soixante-dix associant les experts du réseau du ministère de l'Équipement et de l'industrie cimentière afin de trouver une explication à cette réaction et de mettre au point des essais d'analyse. Ces travaux ont abouti à l'établissement de recommandations de préventions, provisoires en 1991 puis définitives en 1994.

Le phénomène d'alcali-réaction est depuis plusieurs années parfaitement maîtrisé, il est maintenant possible de prévenir tout risque d'alcali-réaction dans les bétons et éviter tout désordre.

II.1.5. Actions de l'eau de mer sur le béton

Un béton exposé en site maritime peut être l'objet de plusieurs types d'agressions:

- Agressions mécaniques dues à l'action des vagues et des marées, abrasion due aux chocs des matériaux flottants et érosion due aux effets des vagues;
- Agressions chimiques dues à l'action des chlorures présents dans l'eau de mer et des sulfates;
- Agressions climatiques dues aux variations de température et éventuellement à des phénomènes de gel-dégel.

Les structures situées en site maritime sont exposées à trois types de configurations. Selon les variations du niveau de la mer, elles peuvent être:

- Continuellement immergées (béton situé sous le niveau de la mer à marée basse), les bétons situés dans cette zone sont rarement l'objet de dégradations importantes;
- Continuellement émergées et soumises aux embruns et brouillards marins contenant des chlorures, les bétons situés dans cette zone peuvent subir de légères agressions;
- Alternativement émergées ou immergées en fonction du niveau de la mer (zones de marnage déterminées par les niveaux de marée haute et basse) ou soumises aux éclaboussures provoquées par les vagues, les bétons situés dans cette zone sont les plus agressés.

Le béton en présence d'eau de mer est soumis à plusieurs réactions chimiques faisant intervenir des sulfates, des chlorures et des ions magnésium selon plusieurs mécanismes (cristallisation de sels expansifs, précipitation de composés insolubles, attaques ioniques, dissolution de la portlandite, etc.).

Certaines réactions peuvent avoir des effets bénéfiques sur le béton (telle que par exemple la création d'une couche protectrice ou l'obturation des pores par les précipités), d'autres peuvent générer des phénomènes d'expansion ou de lixiviation. La présence d'ions chlorure peut provoquer des phénomènes de corrosion des armatures, si la compacité du béton et l'enrobage

des armatures ne sont pas adaptés aux conditions d'exposition. Les sulfates et les chlorures peuvent réagir sur les composés hydratés du ciment.

II.1.6. Phénomène de gonflement interne sulfatique

L'ettringite est un hydrate contenant des sulfates dont les propriétés de gonflement sont connues depuis plus d'un siècle. C'est pourquoi, des précautions particulières sont prises lorsqu'un béton est exposé à un environnement riche en sulfates, notamment vis-à-vis des caractéristiques du ciment.

Cependant, dans certains cas rares, lorsque le béton subi un échauffement au jeune âge, la formation différée d'ettringite peut avoir lieu sans apport d'ions sulfate externes. Ces réactions sont susceptibles de provoquer un gonflement du béton. Les dégradations sont caractérisées par des fissures en surface qui apparaissent après plusieurs années d'exposition à des conditions sévères caractérisées par une forte humidité. Ce phénomène rare peut se rencontrer, seulement dans des environnements humides, dans des pièces massives en béton coulées en place en période estivale ou sur des pièces de béton ayant subi un traitement thermique. Il est souvent dénommé DEF (Delayed Ettringite Formation), traduction anglaise de Formation Différée d'Ettringite. L'origine du gonflement et la nature des paramètres impliqués ont fait l'objet de nombreuses études.

Il a été constaté l'incidence importante:

- De la température du béton lors de sa prise et de ses traitements thermiques;
- De la teneur en alcalin sur la solubilité de l'ettringite;
- De l'humidité (l'eau étant un des facteurs fondamentaux de la réaction).

Les cas de structures concernées par cette pathologie sont peu nombreux.

II.2. Origines de la remontée des eaux

L'eau inondant les milieux d'étude vient principalement des précipitations. Mais ces dernières ne sont pas les seules causes car parmi les principales, il y a les actions humaines.

En effet, pour le cas des quartiers Kajaga et Industriel, les inondations sont causées par :

- L'érosion des montagnes surplombant la ville de Bujumbura qui occasionne des dépôts des sédiments solides dans le Lac Tanganyika, conduisant ainsi à la montée du niveau des eaux,
- Les constructions sur le seul exutoire du lac Tanganyika (la rivière Lukuga).
  En effet, au cours d'une visite sur la rivière Lukuga, les experts de l'autorité du Lac Tanganyika ont constaté que le lit de cette rivière a été rétréci à cause des constructions anarchiques autour de cet unique exutoire du Lac Tanganyika (atelier Autorité du lac Tanganyika du 12 juillet 2021),

- Le manque de réseaux de canalisation, surtout dans le quartier Kajaga,
- Un relief favorable aux inondations (presque plat).

Pour ce qui est du quartier Miroir, les inondations sont principalement dues au caractère imperméable du sol (sol argileux) et aux réseaux de canalisations mal dimensionnés comme le montre la ***Fig.7***.



Fig.7. *Débordement d'un réseau de canalisation (quartier Miroir, juin 2021)*

II.3. Hypothèses sur les origines de l'agressivité des eaux

Comme précédemment évoqué, certaines parties de la ville de Bujumbura sont situées sur des terrains humides marécageux, peu viabilisées et entourées par des sites agricoles. Ceci a pour conséquence, le risque de mélange des eaux de pluie aux eaux usées et agricoles.

En effet, plusieurs études ont démontré que les eaux provenant des installations agricoles et industrielles contiennent des composés soufrés et des bactéries réductrices de sulfate qui transforment ces composés en acide sulfhydrique (H2S). Ce dernier peut ensuite être oxydé par d'autres bactéries puis transformé en acide sulfurique (H2SO4). Ce phénomène est appelé « attaque acide bactérienne » (Dossiers CSTC, 2004). Le béton étant un matériau basique (pH > 12,5), il est susceptible d'être attaqué par les acides car ces derniers réagissent avec les composés calciques du béton pour former le sel de calcium (acide corrodant).

Les engrais chimiques et les eaux usées industrielles, quant à eux, contiennent souvent des sels agressifs, tels que le sel d'ammonium et le sel de magnésium. Le sel d'ammonium réagit avec l'hydroxyde de calcium pour former l'ammoniac, un gaz volatil qui s'échappe du béton (Dossiers CSTC, 2004).

En plus de cela, les effluents d'élevage ou de l'industrie agroalimentaire (lisiers, jus d'ensilage ou lactosérums) contiennent des bactéries et acides organiques qui provoquent la dégradation des ouvrages. En effet, au cours d'un stockage de longue durée du lisier (matières organiques produites par les bovins, ovins..), les acides gras volatils sont progressivement dégradés en méthane (CH_4) et en dioxyde de carbone (CO_2). Et au cours de l'ensilage, les sucres solubles du fourrage verts sont dégradés en acide lactique (ou en acide acétique, en l'absence de l'air et sous l'action de bactéries fermentaires). Les lactosérums sont semblables aux jus d'ensilage en termes de pH, nature des acides organiques et bactéries présentes et de l'attaque sur les matrices cimentaires (A Bertron et Al, 2005).

Le lac Tanganyika (qui est la cause des inondations dans les quartiers Kajaga et Industriel) reçoit les eaux des différents affluents dont les compositions chimiques sont différentes. Le plus important de cas affluents est la Ruzizi (le déversoir du lac Kivu) qui a des eaux alcalines, très riches en sels dissous, avec un pH de 9,1 en surface (voir **Annexe 1**). La rivière fournit plus de 50 % du total de sels se déversant dans le lac (Beauchamp, 1939). La rivière Ruzizi contient des proportions en ions largement similaires avec celles du lac Tanganyika (Talling & Talling, 1965). Ces affluents présentent une faible teneur aux paramètres analysés par rapport au lac Tanganyika, car le lac est un milieu ouvert où les échanges se font, en plus ces substances ont tendance de se concentrer au lac (Lumami K et Al, 2014).

Le quartier Miroir quant à lui est entouré de champs agricoles et une station d'épuration des eaux usées (qui pourrait infectée la nappe), ce qui pourrait sous-entendre la présence des substances précédemment évoquées.

En se basant sur ces possibilités de mécanismes d'attaque, il y a moyen de penser que les sites précédemment mentionnées présentes des eaux agressives. Ainsi en cas de suspicion de substances agressives, une évaluation de l'agressivité des eaux susceptibles d'attaquer le béton est nécessaire à l'aide d'analyse chimique.

La résistance du béton vis-à-vis des attaques dissolvantes repose principalement sur sa résistance physique et chimique (type de ciment et éventuelles additions). La bonne résistance physique du béton dépend sur la structure dense du béton, elle-même dépendant du rapport E/C, le type de ciment, du compactage et de la cure (Technologie du béton).

En considérant un même type de ciment (ciment Dangote 42,5 R), un compactage soigné et une cure suffisante, il y aura conception des éprouvettes en béton de classe différente afin d'observer la variation de ses résistances à la compression au fil des jours.

III. MATERIEL ET METHODES

Pour les analyses chimiques des eaux utilisées dans la submersion des éprouvettes en béton, elles ont été prélevées au hasard sur terrain dans les dix premiers jours du mois de juillet. Les échantillons d'eau ont été ramenés au laboratoire de chimie conservé dans un bac contenant des glaçons afin d'éviter l'altération de ces derniers.

Les paramètres tels que les sulfates, les chlorures et l'ammonium s'expriment en mg/l. Le pH a été prélevé in situ. La mesure du pH fut exécutée à l'aide d'un analyseur électrochimique Consort C6010.

- Le dosage des ions sulfates a été déterminé par la méthode néphélométrique,
- Le dosage des ions chlorures a été déterminé par le système Pallintest à l'aide d'un Photomètre 7500,
- Le dosage des ions ammonium a été déterminé par la méthode de Nessler à l'aide d'un Spectrophotomètre.

Pour les matériaux constituants le béton, il fut utilisé :

- Le ciment Dangote 42,5R (Zambie) avec une masse volumique de 3,1 kg/l,
- Le gravier ayant été prélevé dans la rivière Mugere avec une masse volumique absolue de 2,6 kg/l,
- Le sable ayant été prélevé dans la rivière Ntahangwa avec une masse volumique de 2,65 kg/l,
- L'eau de gâchage a été puisée dans les réseaux de distribution d'eau de la Regideso.

Il n'y a pas eu de critères spécifiques sur le choix des constituants du béton, le seul critère a été la disponibilité et la proximité de ces derniers

L'analyse granulométrique des granulats (sable et gravier) a été effectuée en se basant sur la norme « P 18-560 : Analyse granulométrique par tamisage ». Après tamisage, le module de finesse du sable a été calculé et la valeur trouvée est de 2,69 (EN 13139).

La méthode utilisée pour la formulation des bétons B30 et B40 a été la « méthode de Dreux-Gorisse ».

Les essais de compression des éprouvettes en béton durci ont été effectués suivant la norme EN 12390-4 et le résultat d'essai en compression a été déterminé par la norme NF EN 206-1. La machine utilisée dans la réalisation des essais de compression est « une machine Matest de compression du béton 1500 kN semi-automatique, cyber-plus évolution » (voir ***Fig.8***.).



Fig.8. *Machine Matest de compression du béton*

III.1. IDENTIFICATION DES MATERIAUX

III.1.1. L'eau de gâchage

L'eau de gâchage utilisée est une eau de robinet de bonne qualité du laboratoire des matériaux de génie civil de l'université du Burundi (campus Kiriri). L'analyse chimique et minéralogique de l'eau n'a pas été effectuée car cette eau a été considérée potable.

Mais à titre d'information, la norme NF EN 206-1 fournit les normes de potabilité de l'eau sur base d'analyses physico chimique et de minéralisation (**Tableau 1** et **Tableau 2**).

Tableau 1: Normes de potabilité (Analyse physico chimique)

Paramètres physico chimique	**Normes de potabilité**
pH	6.5 et 9
Conductivité (ms/cm)	< 2,8
Turbidités eau brute (NTU)	< 5
Résidu sec (mg/L)	< 1500
Température	< 25

Tableau 2: Normes de potabilité (Analyse minéralogique)

Minéralisation globale (mg/L)	Normes de potabilité
Ca^{2+}	< 200
Cl^{-}	< 500
SO_4	< 400
Mg^{2+}	< 150
Na^{+}	< 200
K^{+}	< 12

III.1.2. Granulats

III.1.2.1. Sable

Dans ce travail, parmi les caractéristiques physiques du sable qui ont été étudiées, nous pouvons citer :

- Analyse granulométrique,
- La masse volumique apparente,
- La masse volumique absolue,
- Module de finesse.

Dans cette partie, nous allons uniquement développer deux caractéristiques (la masse volumique apparente et la masse volumique absolue), tandis que les deux restantes le seront dans les chapitres postérieurs de formulation du béton (Page 30).

III.1.2.1.1. *Masse volumique apparente*

La masse volumique apparente est déterminée suivant les recommandations de la norme EN 18-554.

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 des particules ainsi que les vides entre particules.



Fig.9. *Essai masse volumique du sable (Abbadi Fatima, 2019)*

La masse volumique apparente :

$$\rho_{(app)} = \frac{M}{V} = \frac{M_t - M_{moule}}{V}$$

Où M : Masse du sable

V : Volume de la moule (Récipient)

Ainsi, l'essai nous a fourni les résultats suivants (**Tableau 3**)

Tableau 3 : Résultats de l'essai masse volumique apparente du sable

Matériau	**Vol. récipient (*l*)**	**M_{moule} (kg)**	**M_t (kg)**	**ρ_{app} (kg/*l*)**	**$\rho_{app.moy}$ (kg/*l*)**
Sable	1.5	7.7	9.94	1.49	**1.5**
			9.96	1.5	
			9.95	1.5	

III.1.2.1.2. *Masse volumique absolue*

La masse volumique absolue ρ_{abs} est la masse par unité de volume de la matière qui constitue le granulat, sans tenir compte des vides pouvant exister dans ou entre des grains. C'est aussi la masse de l'unité de volume de la substance, c'est-à-dire le rapport entre sa masse et son volume absolu.



Fig.10. *Essai de la masse volumique absolue*

La masse volumique absolue du sable est déterminée par la formule :

$$\rho_{abs} = \frac{M}{(V_2 - V_1)}$$

Où M : Masse du sable

V_1 : Volume de l'eau avant l'ajout de sable

V_2 : Volume de l'eau après l'ajout de sable

Ainsi, l'essai nous a fourni les résultats suivants (**Tableau 4**)

Tableau 4 : Résultats de l'essai masse volumique absolue du sable

Matériau	**M (kg)**	**V_1 (*l*)**	**V_2 (*l*)**	**ρ_{abs} (kg/*l*)**	**$\rho_{abs.moy}$ (kg/*l*)**
Sable	0.6	1	1.23	2.65	**2.65**
			1.23	2.65	
			1.23	2.65	

III.1.2.2. <u>Gravier</u>

Parmi les caractéristiques physiques du gravier qui ont été étudiées, nous pouvons citer :

- Analyse granulométrique,
- La masse volumique apparente,
- La masse volumique absolue.

L'analyse granulométrique a été développée également dans les chapitres postérieurs (Page 30).

Le protocole de détermination des masses volumiques est le même que celui du sable.

Les essais nous ont fourni les résultats suivants (**Tableau 5** et **Tableau 6**)

Tableau 5 : Résultats de l'essai masse volumique apparente du gravier

Matériau	**Vol. récipient (*l*)**	**M_{moule} (kg)**	**M_t (kg)**	**ρ_{app} (kg/*l*)**	**$\rho_{app.moy}$ (kg/*l*)**
Gravier	1.5	7.7	9.85	1.43	**1.42**
			9.78	1.38	
			9.86	1.44	

Tableau 6 : Résultats de l'essai masse volumique absolue du gravier

Matériau	M (kg)	V_1 (*l*)	V_2 (*l*)	ρ_{abs} (kg/*l*)	$\rho_{abs.moy}$ (kg/*l*)
Gravier	0.6	1	1.230	2.60	**2.6**
			1.231	2.59	
			1.230	2.6	

III.2.ETUDE DES PARAMETRES VARIABLES

III.2.1. L'eau de maturation

Les eaux utilisées dans la cure du béton ont été de composition différente afin d'évaluer ses effets sur la résistance à la compression de ce dernier.

En effet, il fut utilisé, pour la cure du béton, 4 types d'eau prélevés sur des sites différents:

- Eau du laboratoire (des réseaux de distribution d'eau) pour les éprouvettes témoins,
- Eau provenant des inondations du quartier Kajaga,
- Eau provenant des inondations du quartier Miroir,
- Eau provenant des inondations du quartier Industriel.

Dans la figure ***Fig.11***, nous observons les éprouvettes subissant une cure dans l'un des eaux prélevées.



Fig.11. *Cure des éprouvettes dans l'une des eaux prélevées*

Une analyse chimique préliminaire a été réalisée avant d'évaluer ces effets sur le béton. Cette analyse chimique a été basée sur les éléments susceptibles d'attaquer le béton.

Parmi ces éléments susceptibles d'attaquer le béton, il a eu évaluation de l'acidité et de la présence de certains ions. Le pH a été mesuré in situ à l'aide d'un analyseur électrochimique Consort C6010 (***Fig.12***) alors qu'il y eu nécessite de certains protocoles (méthodes) pour déterminer la présence et la concentration de ces ions en question.



Fig.12*. Mesure du pH in situ*

III.2.1.1. <u>Protocole de mise en évidence des ions sulfates</u>

Les méthodes de mise en évidence des anions et cations sont pleinement développées dans l'ouvrage « l'analyse de l'eau » de Jean Rodier.

Pour le dosage des sulfates, l'analyste a le choix entre plusieurs méthodes :

- La méthode gravimétrique,
- La méthode néphélométrique,
- La méthode par chromatographie ionique.

Parmi ces méthodes, la méthode néphélométrique a été utilisée pour analyse.

Le principe de cette méthode consiste à précipiter les sulfates en milieu chlorhydrique à l'état de sulfate de baryum. Le précipité ainsi obtenu est stabilisé à l'aide d'une solution de Tween 20 ou

de polyvinyl-pyrrolidone. Les suspensions homogènes sont mesurées au spectromètre (RODIER J. et al., 2009).

La première étape consiste à l'établissement de la courbe d'étalonnage. Cette courbe se construit à l'aide d'une série de 7 tubes numérotés de composition chimique suivante comme le montre le **Tableau 7**.

Tableau 7: Composition des tubes numérotés pour établissement de la courbe d'étalonnage

Numéro des tubes	**T**	**I**	**II**	**III**	**IV**	**V**	**VI**
Solution étalon de sulfates (mL)	0	1	3	5	7	9	10
Eau d'ionisée (mL)	50	49	47	45	43	41	40
Acide chlorhydrique au 1/10 (mL)	1	1	1	1	1	1	1
Solution de chlorure de baryum stabilisée (mL)	5	5	5	5	5	5	5
Correspondance en mg/L de sulfates	0	3	9	15	21	27	30

Agiter 2 ou 3 fois énergiquement. Après 15 minutes de repos, agiter à nouveau et faire la lecture au spectromètre à la longueur d'onde de 650 nm afin d'évaluer l'absorbance des liquides préparés. Les résultats du spectromètre sont consignés dans le **Tableau 8**.

Tableau 8 : Absorbance des solutions pour établissement de la courbe d'étalonnage (sulfates)

Concentration (mg/L)	**Absorbance**
0	0.001
1	0.146
3	0.364
5	0.507
7	0.702
9	0.875
10	0.985

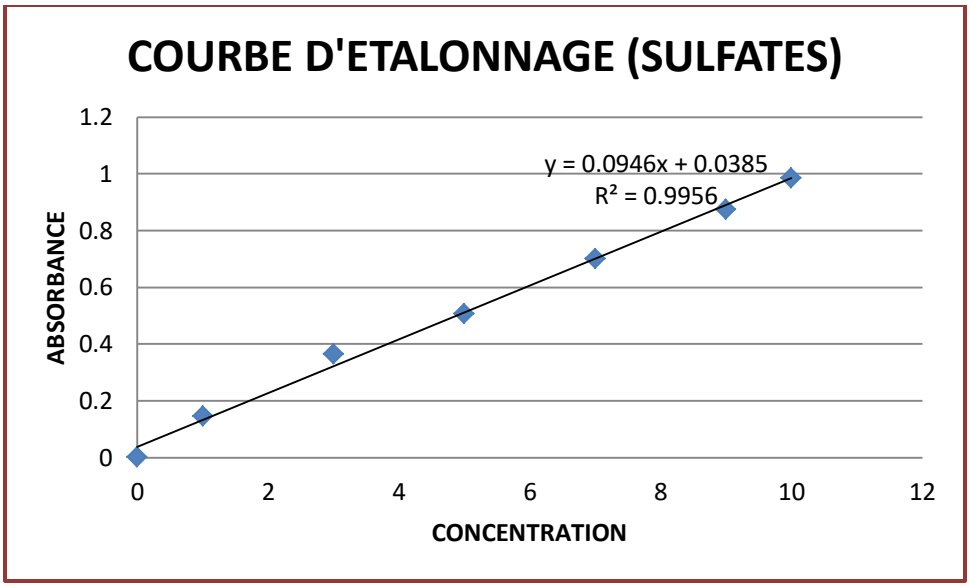


Fig.13. *Courbe d'étalonnage (sulfates)*

Cette courbe fournit deux éléments indispensables (la pente et l'ordonnée à l'origine) pour le calcul de la concentration des ions sulfates.

Tableau 9 : Pente et ordonnée à l'origine de la courbe d'étalonnage des sulfates

Pente	0.0945778
Ordonnée à l'origine	0.0385397

L'étape suivante consiste à la détermination de l'absorbance des eaux à analyser. Comme mode opératoire, il faut introduire successivement dans un tube :

- Eau à analyser (50 mL),
- Acide chlorhydrique au 1/10 (1 mL),
- Solution de chlorure de baryum + Tween 20 (5 mL).

Préparer dans les mêmes conditions un tube témoin en remplaçant l'eau à analyser par de l'eau déionisée.

Agiter énergiquement et laisser reposer 15 minutes. Agiter de nouveau et faire les lectures au spectromètre à la longueur d'onde de 650 nm. Tenir compte de la valeur lue pour le témoin. Se reporter à la courbe d'étalonnage.

Tableau 10 : Absorbance des eaux prélevées (à longueur d'onde de 650 nm)

Site	Absorbance
Kajaga	0.202
Miroir	0.496
Industriel	0.043

La concentration en ions sulfates est donnée par la formule :

$$\text{Concentration} = \frac{(\text{absorbance obtenue} - \text{ordonnée à l'origine})}{\text{pente}}$$

III.2.1.2. <u>Protocole de mise en évidence des ions chlorures</u>

Les ions chlorures ont été mis en évidence par le système Pallintest à l'aide d'un Photomètre 7500.

Comme mode opératoire :

- Rincer le tube avec l'échantillon (eau prélevée) en laissant deux ou trois gouttes,
- Ajouter l'indicateur DPD No 1 et écraser (voir **Fig.14** et **Fig.15**),



***Fig.14**. Pastilles DPD 1*



***Fig.15**. Pastille écrasée dans un tube*

- Ajouter l'échantillon jusqu'à 10 mL (dans le cas de présence de chlorures, il y aura une coloration rosâtre),

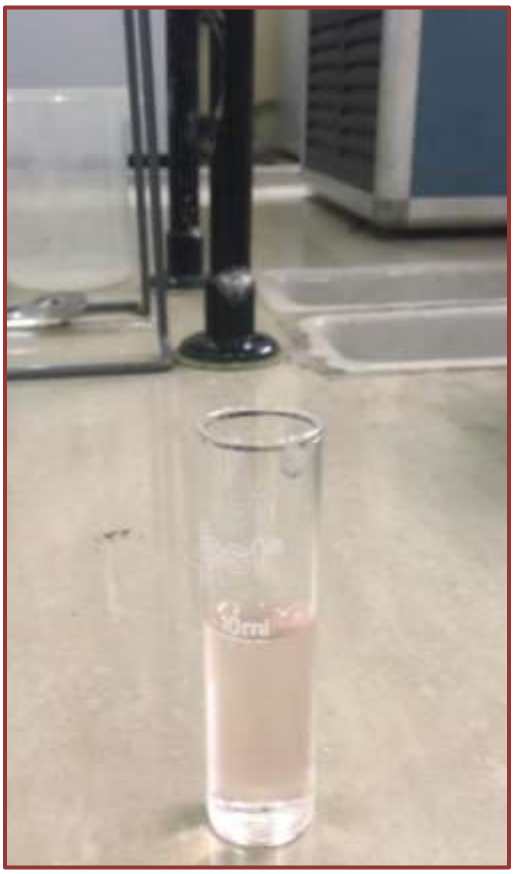


***Fig.16**. Coloration rosâtre de l'eau (présence des ions chlorures)*

- Reprendre le même processus avec de l'eau distillée,
- Placer successivement les deux échantillons dans le photomètre et lire les concentrations.



Fig.17*. Lecture sur photomètre*

III.2.1.3. <u>Protocole de mise en évidence des ions ammonium</u>

Le mode opératoire pour déterminer l'absorbance des eaux prélevées consiste à :

- Prendre 50 mL d'eau distillée et 50 mL d'eau prélevée,
- Ajouter deux gouttes de tartrate et secouer,
- Ajouter 1 mL de réactif de Nessler (coloration jaunâtre dans le cas de présence d'ammonium) et secouer.



***Fig.18**. Coloration jaunâtre de l'échantillon (présence d'ions ammonium)*

- Placer les échantillons d'eau distillée et d'eau prélevée dans les tubes pour spectrophotomètre (**Fig.19**).



***Fig.19**. Tube pour spectrophotomètre*



***Fig.20**. Spectrophotomètre*

Tableau 11 : Absorbance des eaux prélevées

Site	Absorbance
Kajaga	0.184
Miroir	0.474
Industriel	0.149

La courbe d'étalonnage obtenue pour les solutions étalons d'ammoniums est la suivante :

Tableau 12: Absorbance des solutions pour établissement de la courbe d'étalonnage (NH4)

Concentration (mg/L)	Absorbance
0	0
1	0.006
3	0.167
5	0.326
8	0.466
10	0.604

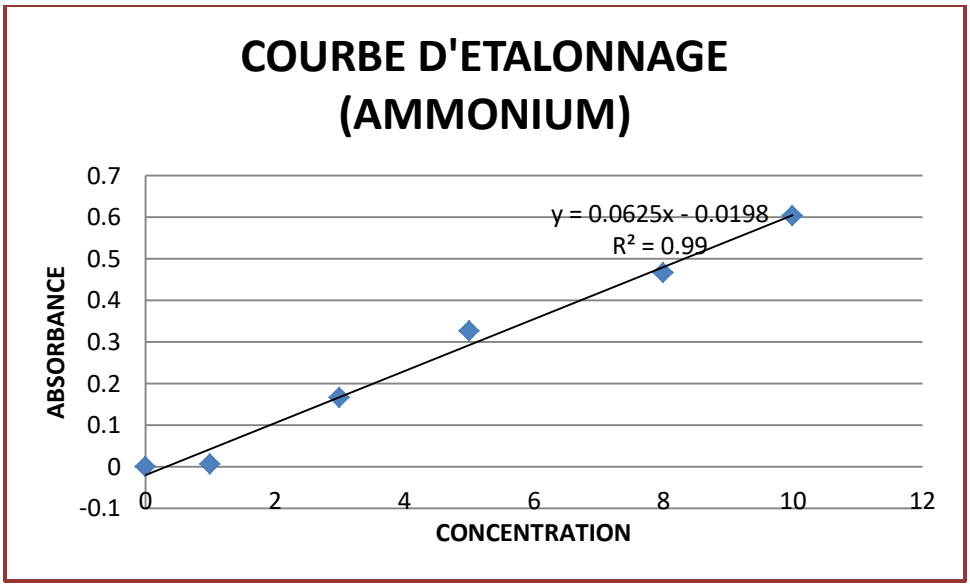


Fig.21. *Courbe d'étalonnage (ammonium)*

Comme précédemment évoqué, cette courbe permet l'obtention de la pente et de l'ordonnée a l'origine.

Tableau 13: Pente et ordonnée à l'origine de la courbe d'étalonnage (ammonium)

Pente	0.0625097
Ordonnée à l'origine	-0.019794

La concentration en ions ammoniums est aussi donnée par la formule :

$$\text{Concentration} = \frac{(\text{absorbance obtenue} - \text{ordonnée à l'origine})}{\text{pente}}$$

Tableau 14 : Résultats des analyses chimiques (**Annexe 2)**

Sites d'échantillonnage	**Paramètres analysés**			
	pH	Sulfates (mg/L)	Chlorures (mg/L)	Ammonium (mg/L)
Kajaga	7,23	1,73	0,26	3,26
Miroir	6,85	4,84	0,13	7,90
Industriel	7,29	0,05	0,19	2,70

Les résultats montrent des concentrations élevées pour le quartier Miroir, elles sont dues probablement à la présence des surfaces agricoles ainsi que des industries.

D'après la norme suisse SN EN 206 qui évalue sur la base des valeurs limites, le degré d'agressivité de la nappe phréatique, ou des sols de composition essentiellement naturelle, il y a possibilité de penser, compte tenu de leurs concentrations, que les sites en question ont des eaux pas assez agressives (voir **Annexe 3**). Mais leurs présences ne peuvent passer inaperçues car leurs concentrations varient suivant les années voir les saisons, aussi la présence combinée des ions sulfates et ammonium est dangereux pour le béton (dégradation du ciment).

En plus de cela, il n'y a pas eu évaluation chimique complète de ces eaux : le dioxyde de carbone, la présence des acides susceptibles d'attaquer le béton (acide sulfurique, acide acétique..), la présence des bases fortes (NaOH, KOH..), la présence des bactéries réductrices de sulfates. Cette évaluation incomplète a été causée par des moyens financiers insuffisants.

D'où nécessité d'étude de variation de la résistance à la compression des éprouvettes en béton submergées dans ces eaux.

III.2.2. Le béton

Pour un béton courant, la composition est définie par 3 paramètres :

- La quantité de ciment,
- La quantité de sable,
- La quantité de gravier.

Le béton le plus courant est de composition suivante :

- 350 kg de ciment,
- 400 l de sable,
- 800 l de gravier,
- L'eau de quantité qui est la moitie en poids de celle du ciment.

Mais cette définition est incomplète, il faut un béton avec des caractéristiques précises et régulières.

Pour calculer le dosage du mélange de béton, on doit connaitre certaines caractéristiques granulométriques telles que :

- Le module de finesse du granulat fin,
- La dimension maximale des particules du gros granulat,
- La distribution granulométrique,
- Etc

Ainsi pour connaitre ces caractéristiques, il faut premièrement une étude granulométrique qui consiste à:

- Prélever les granulats (**Fig.22**),



***Fig.22**. Granulats utilisées pour l'analyse granulométrique*

- Sécher les granulats à 105ºc pendant 24 heures dans une étuve,



***Fig.23**. Etuve*

- Mélanger les granulats, sable à part et gravier à part, afin d'avoir des échantillons représentatives de toutes les diamètres,
- Secouer dans les tamis et mesurer les refus.



***Fig.24**. Tamis pour analyse granulométrique*

III.2.2.1. <u>Analyse granulométrique</u>

Pour l'essai granulométrique qui a été fait sur les granulats fins (sable) et les granulats grossiers (graviers), nous avons obtenu les résultats consignés dans les tableaux 15 et 16.

Tableau 15 : Résultats de tamisage du gravier

Diamètre des tamis	Refus cumulés (g)	Refus cumulés (%)	Passants (%)
63 mm	0	0	100
31,5 mm	120	6	94
16 mm	810	40,5	59,5
8 mm	1600	80	20
4 mm	1900	95	5
2 mm	1970	98,5	1,5

Tableau 16 : Résultats de tamisage du sable

Diamètre des tamis	Refus cumulés (g)	Refus cumulés (%)	Passants (%)
16 mm	0	0	100
8 mm	20	1	99
4 mm	50	2,5	97,5
2 mm	110	5,5	94,5
1 mm	340	17	83
0,5 mm	1110	55,5	44,5
0,25 mm	1830	91,5	8,5
0,125 mm	1940	97	3
0,063 mm	1960	98	2
Fond	2000	100	0

Après obtention de ses résultats, nous pouvons procéder au traçage des courbes granulométriques.

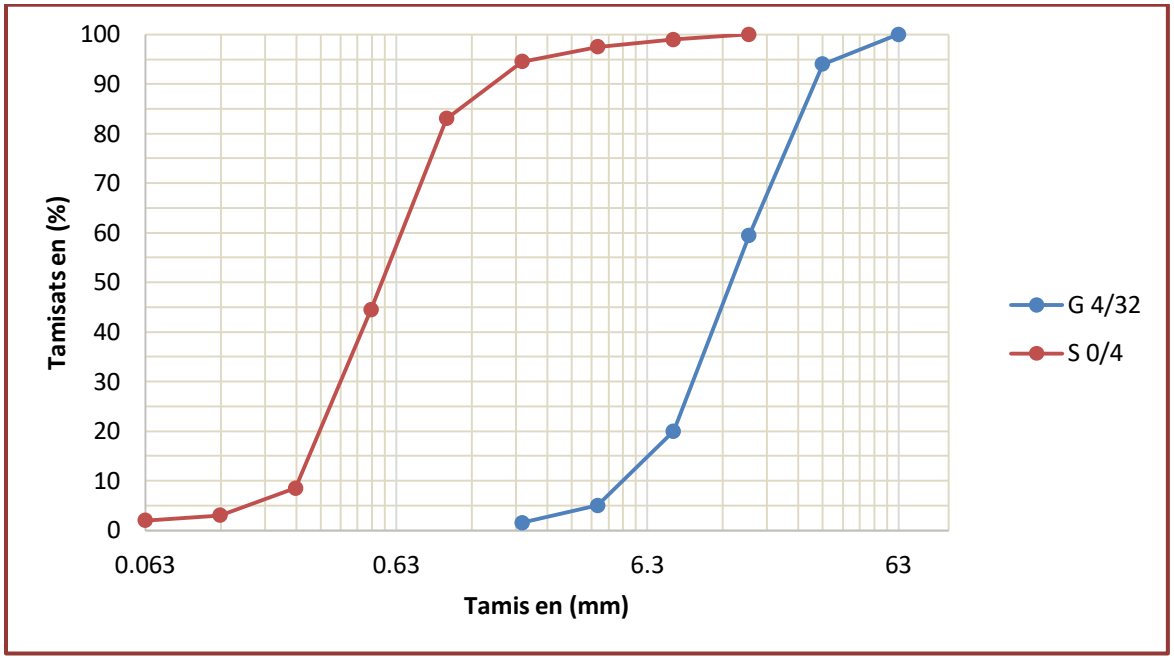


Fig.25. *Courbes granulométriques des granulats*

III.2.2.2. Formulation du béton

La méthode utilisée de formulation du béton est celle de Dreux-Gorisse.

La méthodologie d'utilisation de cette méthode est :

- Détermination de la dimension du gros granulat (Dmax = 31,5mm, cfr **Tableau 15**),
- Détermination du dosage en éléments fins (dosage du ciment = 350 kg/m³),
- Détermination du dosage en eau,
- Contrôle des qualités de granulat (sable),
- Tracé de la courbe granulométrique de référence OAB,
- Tracé de la ligne de partage des courbes granulométriques,
- Détermination du dosage des granulats,
- Densité théorique du béton frais,
- Correction.

III.2.2.2.1. Dosage des granulats

Après obtention des courbes granulométriques, nous procédons à la détermination du dosage des granulats.

Les étapes de détermination du dosage des granulats sont :

- Tracé de la courbe granulométrique de référence OAB obtenue à l'aide des coordonnées suivantes
  Coordonnée de O : (0.063,0),
  Coordonnée de B : (Dmax, 100),
  Coordonnée de A : (X, Y), avec X = Dmax/2 si Dmax <= 20 mm sinon X est le milieu du segment limité par les tamis 5 mm et D et Y= 50 - (Dmax)^0.5 + K + Ks + Kp.
  Le paramètre K dépend principalement du type de vibration, de la forme des granulats ainsi que du dosage en ciment. Il est obtenu à l'aide du **Tableau 17** :

Tableau 17 : Valeurs du terme correcteur K

Vibration	**Faible**		**Normale**		**Puissante**	
Forme des granulats	**Roulé**	**Concassé**	**Roulé**	**Concassé**	**Roulé**	**Concassé**
Dosage en ciment						
400 + Fluidt	-2	0	-4	-2	-6	-4
400	0	+2	-2	0	-4	-2
350	+2	+4	0	+2	-2	0
300	+4	+6	+2	+4	0	+2
250	+6	+8	+4	+6	+2	+4
200	+8	+10	+6	+8	+4	+6

Comme la vibration a été normale, la forme des granulats étant roulée et le dosage en ciment de 350 kg/m³, **K = 0**.

La correction supplémentaire Ks est à effectuer si le module de finesse du sable est fort (sable grossier), ce qui correspondra à relever le point A de façon à majorer le dosage en sable et vice versa. Elle peut être effectuée en ajoutant la valeur Ks = 6 Mf -15. La qualité du sable étant de bonne qualité (Mf = 2,69), **Ks = 0**

Si la qualité du béton est précisée pompable, il conviendra de conférer au béton le maximum de plasticité et de l'enrichir en sable par rapport à un béton de qualité courante. On pourra pour cela majorer le terme correcteur K de la valeur Kp = +5 à +10 selon le degré de plasticité désiré. Ainsi, comme le béton considéré est assez plastique, **Kp = 0**.

Ainsi l'ordonnée du point A sera Y = 50 – (31,5)^0.5 = 44,39.

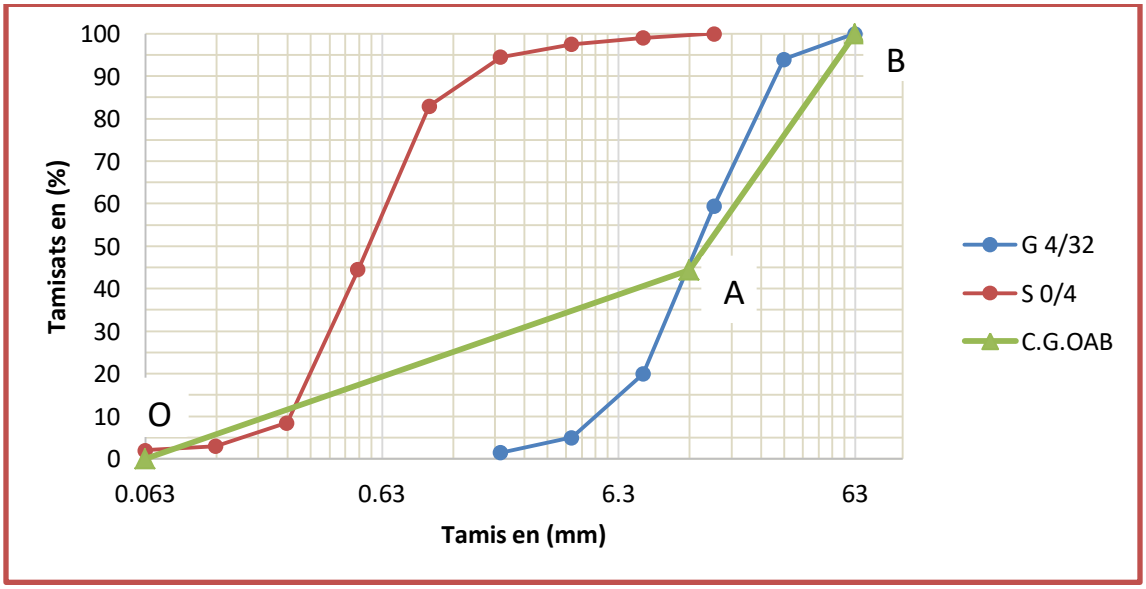


***Fig.26**. Tracé de la courbe granulaire OAB (C.G.OAB)*

- Tracé de la ligne de partage des courbes granulométriques obtenue à l'aide d'une série de 3 sous étapes.
  La première étant de tracer des lignes horizontales partant des pourcentages de tamisât de 5% (DROITE 5%) et 95% (DROITE 95%) et de déterminer leurs points de rencontre avec les courbes granulométriques du gravier (pour celle de 5%) et du sable (pour celle de 95%).

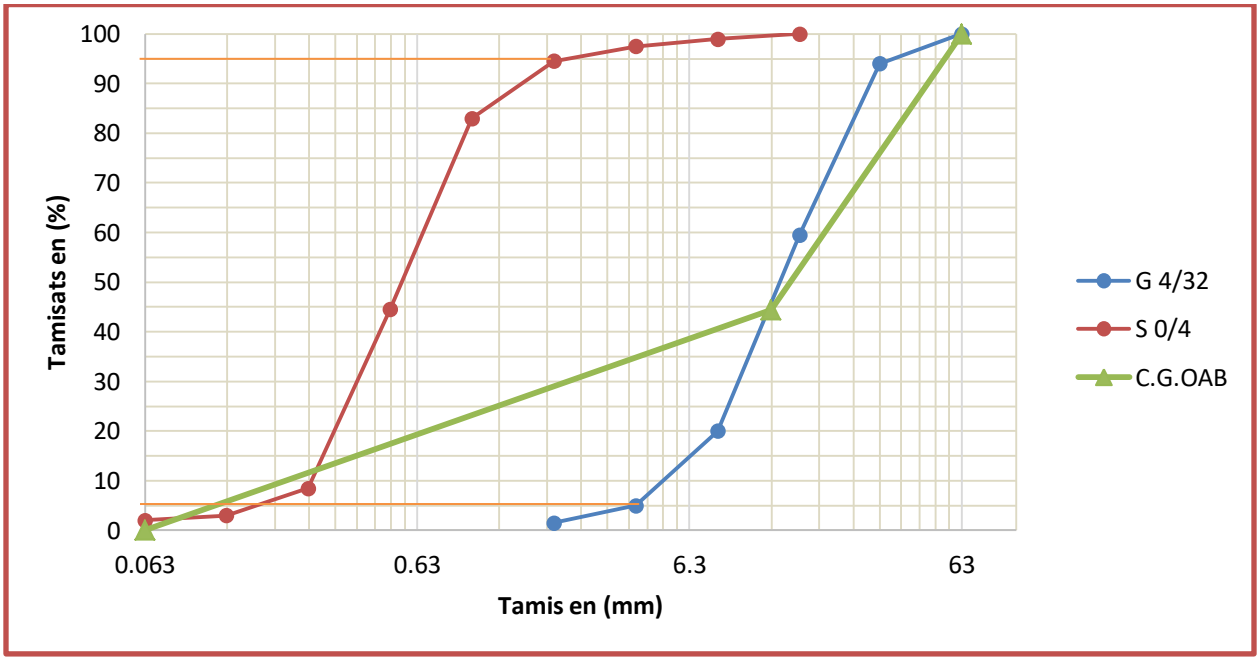


***Fig.27**. Tracé des droites horizontales passant à 5% et à 95% des tamisats*

La seconde étant de relier ces deux points de rencontre par une ligne (D) et de trouver le point de rencontre de cette ligne et la courbe granulométrique de référence OAB.

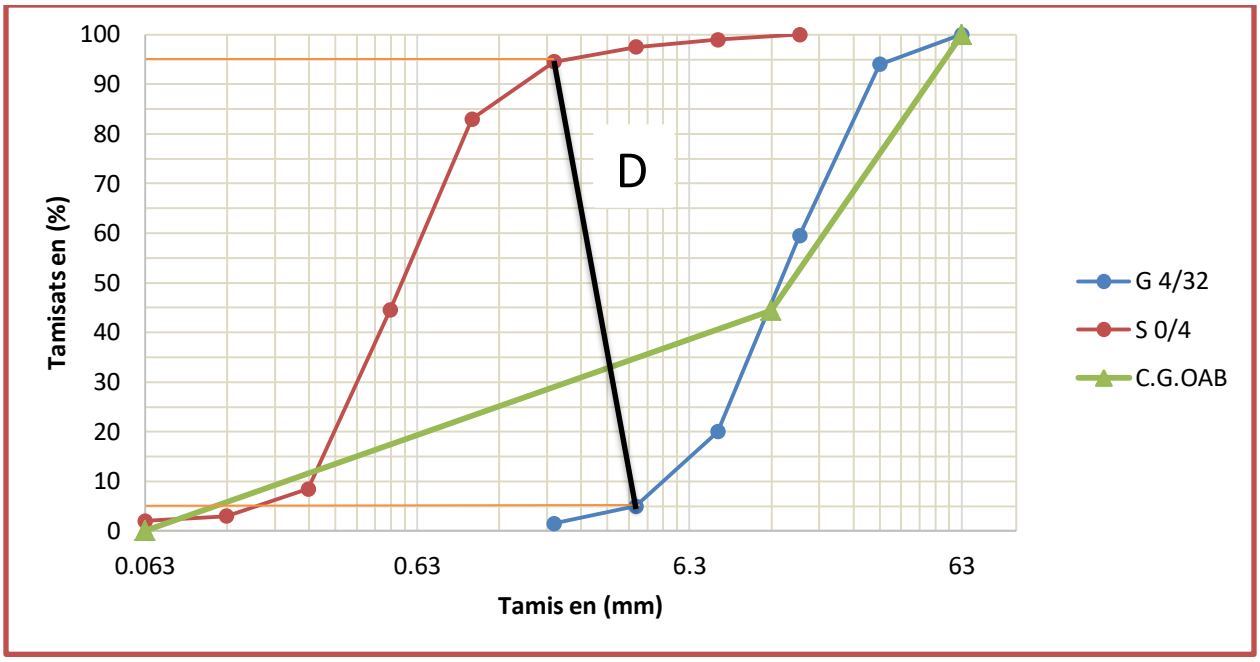


***Fig.28**. Tracé de la droite D*

La dernière est de tracer une ligne verticale passant par ce point de rencontre de la ligne D et de la courbe granulométrique de référence OAB.

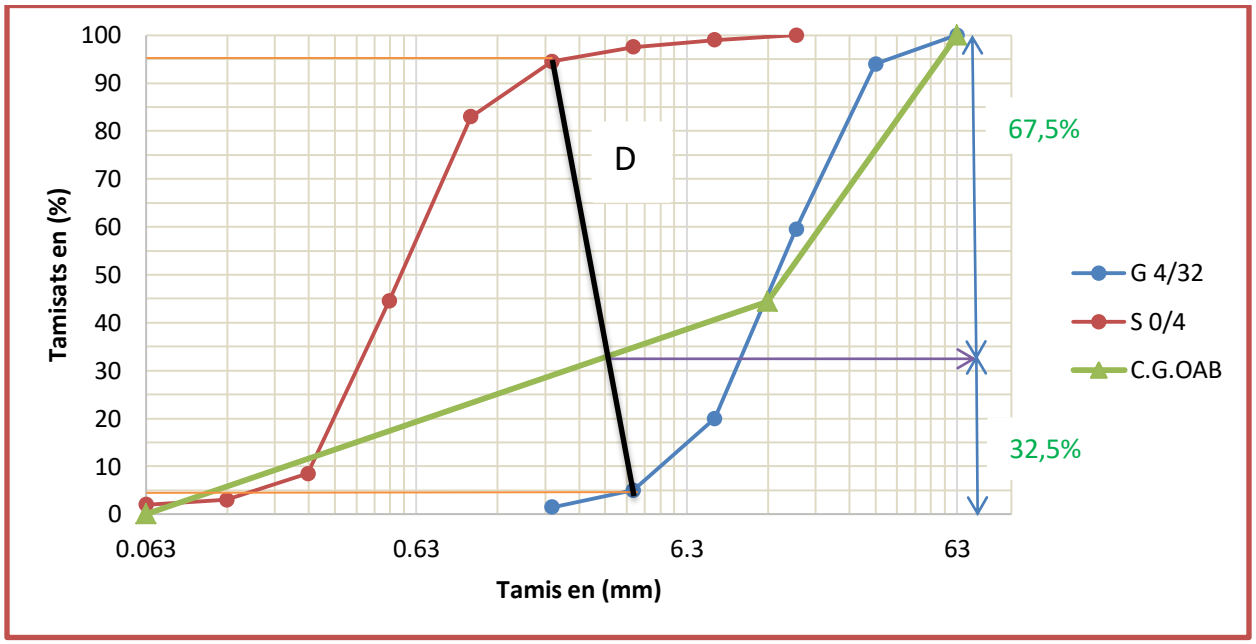


***Fig.29**. Tracé de la droite verticale de détermination des pourcentages sable/ciment*

Cette dernière étape nous fournit le dosage de granulats avec **32,5%** de sable contre **67,5%** de gravier.

III.2.2.2.2. <u>Dosage des constituants du béton B30</u>

- Résistance moyenne à 28 jours : $f_{cm} = f_{c28} \times 1{,}15 = 30\text{MPa} \times 1{,}15 = 34{,}5\text{MPa}$

- Rapport C/E :

$$\frac{C}{E} = \frac{f_{cm}}{G \times \sigma_{c28}} + G$$

Où f_{cm} est la résistance moyenne à 28 jours
G est le coefficient granulaire
σ_{c28} est la classe vraie du ciment

Le coefficient granulaire G dépend de la dimension Dmax et de la qualité des granulats. Pour évaluer la qualité des granulats, il faut déterminer le module de finesse. Cette dernière est calculée par la formule.

$$M_f = \frac{\text{somme des refus cumulés sur les tamis de 4 à 0,125mm}}{100}$$

$$M_f = \frac{2{,}5 + 5{,}5 + 17 + 55{,}5 + 91{,}5 + 97}{100} = 2{,}69$$

Comme le module de finesse peut varier de 2 à 3 avec une valeur optimale de l'ordre de 2,5, la qualité des granulats utilisés peut être considérée bonne.

Tableau 18: Coefficient granulaire G

Qualité des granulats	**Dimension D des granulats**		
	Fins D <= 12,5 mm	**Moyens 20 <= D <= 31,5**	**Gros D >= 50 mm**
Excellente	0,55	0,60	0,65
Bonne, courante	0,45	0,50	0,55
Passable	0,35	0,40	0,45

Pour une dimension Dmax compris entre 20 et 31,5 mm et pour une qualité des granulats bonne, G = 0,5 comme le montre le **Tableau 18**.
Pour ce qui est de la classe vraie du ciment $\sigma_{c28} = \text{classe du ciment} + (0{,}2 \times \text{classe du ciment})$
Ainsi le rapport $\frac{C}{E} = \frac{34{,}5}{0{,}5 \times (42{,}5 + (0{,}2 \times 42{,}5))} + 0{,}5 = 1{,}85$

- Calcul de E :
Comme C/E = 1,85, pour un dosage en ciment de 350 kg/m³, on a E = 350/1,85 = 189,2 l/m³.

- Correction sur le dosage en eau : cette correction dépend de la dimension maximale des granulats Dmax.

Tableau 19 : Correction sur le dosage en eau en fonction de D

Dimension maximale des granulats en mm	4	8	12,5	20	31,5	50	80
Correction sur le dosage en eau	+15	+9	+4	0	-4	-8	-12

Pour Dmax = 31,5 mm, il y a correction de -4% (**Tableau 19**).
Ainsi, $E_C = 189{,}2 \times (0{,}96) \mathrm{l/m^3} = 181{,}63\ \mathrm{l/m^3}$

- Calcul du coefficient de compacité γ :
  Ce dernier dépend principalement de la consistance voulue, du serrage ainsi que de la dimension maximale des granulats (**Tableau 20**).

Tableau 20 : Valeur du coefficient de compacité

Consistance	**Serrage**	**Coefficient de compacité γ**						
		D=4	**D=8**	**D=12,5**	**D=20**	**D=31,5**	**D=50**	**D=80**
Molle	Piquage	0,750	0,780	0,795	0,805	0,810	0,815	0,820
	Vibration faible	0,755	0,785	0,800	0,810	0,815	0,820	0,825
	Vibration normale	0,760	0,790	0,805	0,815	0,820	0,825	0,830
Plastique	Piquage	0,760	0,790	0,805	0,815	0,820	0,825	0,830
	Vibration faible	0,765	0,795	0,810	0,820	0,825	0,830	0,835
	Vibration normale	0,770	0,800	0,815	0,825	0,830	0,835	0,840
	Vibration puissante	0,775	0,805	0,820	0,830	0,835	0,840	0,845
Ferme	Vibration faible	0,775	0,805	0,820	0,830	0,835	0,840	0,845
	Vibration normale	0,780	0,810	0,825	0,835	0,840	0,845	0,850
	Vibration puissante	0,785	0,815	0,830	0,840	0,845	0,850	0,855

Pour une consistance plastique, pour un serrage à vibration normale et Dmax = 31,5mm, le coefficient de compacité γ = 0,830. Il n'y a pas nécessité de correction de ce coefficient car ce sont les granulats roulés qui ont été utilisés.

- Volume absolu du ciment : celui-ci est donnée par le rapport entre le dosage en ciment et la masse volumique absolue du ciment.
  Volume absolu du ciment = 350/3,1 =113 l/m³.

- Volume absolu des granulats : il est donnée par la formule V=1000γ-volume absolu du ciment.
  V =717 l/m³.

- Volume absolu du sable : Vs = 717 l/m³ × (32,5/100) = 233 l/m³.

- Volume absolu du gravier : Vg = 717 l/m³ × (67,5/100) = 484 l/m³.

- Dosage pondéral des granulats :

  Vs = 233 × 2,65 = 617,45 kg/m³ et Vg = 484 × 2,6 = 1258,4 kg/m³

En résumé, mous avons le dosage des constituants suivant :

Tableau 21 : Dosage des constituants du béton B30

Ciment	350 kg/m³
Eau	181,63 l/m³
sable	617,45 kg/m³
gravier	1258,4 kg/m³

III.2.2.2.3. <u>Dosage des constituants du béton B40</u>

- Résistance moyenne à 28 jours : $f_{cm} = f_{c28} \times 1{,}15 = 40\text{MPa} \times 1{,}15 = 46\ \text{MPa}$

- Rapport C/E :

$$\frac{C}{E} = \frac{f_{cm}}{G \times \sigma_{c28}} + G$$

  Où f_{cm} est la résistance moyenne à 28 jours
  G est le coefficient granulaire
  σ_{c28} est la classe vraie du ciment

  Le coefficient granulaire G dépend de la dimension Dmax et de la qualité des granulats.

Pour évaluer la qualité des granulats, il faut déterminer le module de finesse. Cette dernière est calculée par la formule :

$$M_f = \frac{\text{somme des refus cumulés sur les tamis de 4 à 0,125mm}}{100}$$

$$M_f = \frac{2,5 + 5,5 + 17 + 55,5 + 91,5 + 97}{100} = 2,69$$

Comme le module de finesse peut varier de 2 à 3 avec une valeur optimale de l'ordre de 2,5, la qualité des granulats utilisés peut être considérée bonne.

Pour une dimension Dmax compris entre 20 et 31,5 mm et pour une qualité des granulats bonne (voir **Tableau 18)**, G = 0,5.

Pour ce qui est de la classe vraie du ciment $\sigma_{c28} = \text{classe du ciment} + (0,2 \times \text{classe du ciment})$

Ainsi le rapport $\frac{C}{E} = \frac{46}{0,5\times(42,5+(0,2\times42,5))} + 0,5 = 2,3$

- Calcul de E :

  Comme C/E = 1,85, pour un dosage en ciment de 350 kg/m³, on a E = 350/2,3 = 152,2 l/m³.

- Correction sur le dosage en eau : cette correction dépend de la dimension maximale des granulats Dmax.

  Pour Dmax = 31,5 mm (voir **Tableau 19)**, il y a correction de -4%.

  Ainsi, $E_C = 152,2 \times (0,96) l/m^3 = 146,11\ l/m^3$

- Calcul du coefficient de compacité γ :

  Ce dernier dépend principalement de la consistance voulue, du serrage ainsi que de la dimension maximale des granulats.

  Pour une consistance plastique, pour un serrage à vibration normale et Dmax = 31,5mm (voir **Tableau 20)**, le coefficient de compacité γ = 0,830. Il n'y a pas nécessité de correction de ce coefficient car ce sont les granulats roulés qui ont été utilisés.

- Volume absolu du ciment : celui-ci est donnée par le rapport entre le dosage en ciment et la masse volumique absolue du ciment.

  Volume absolu du ciment = 350/3,1 =113 l/m³.

- Volume absolu des granulats : il est donnée par la formule V=1000γ-volume absolu du ciment.

  V =717 l/m³.

- Volume absolu du sable : Vs = 717 l/m³ × (32,5/100) = 233 l/m³.

- Volume absolu du gravier : Vg = 717 l/m³ × (67,5/100) = 484 l/m³.

- Dosage pondéral des granulats :

  Vs = 233 × 2,65 = 617,45 kg/m³ et Vg = 484 × 2,6 = 1258,4 kg/m³

En résumé, mous avons le dosage des constituants suivant :

Tableau 22 : Dosage des constituants du béton B40

Ciment	350 kg/m³
Eau	146,11 l/m³
sable	617,45 kg/m³
gravier	1258,4 kg/m³

IV. RESULTATS ET DISCUSSION

Pour les essais de compression sur béton B30 (C 30/37), les résultats sont les suivants :

Tableau 23: Résultat d'essais en compression pour le béton B30 (Kajaga)

KAJAGA		
JOURS	RESULTAT BRUT **R**	RESULTAT D'ESSAI EN COMPRESSION **fc,cube (Annexe 4)**
0	0	0
7	18.2	16.7
28	27.78	26.28
60	26.73	25.23

Tableau 24: Résultat d'essais en compression pour le béton B30 (Miroir)

MIROIR		
JOURS	RESULTAT BRUT **R**	RESULTAT D'ESSAI EN COMPRESSION **fc,cube (Annexe 4)**
0	0	0
7	21.63	20.13
28	29.82	28.32
60	24.28	22.78

Tableau 25: Résultat d'essais en compression pour le béton B30 (Industriel)

INDUSTRIEL		
JOURS	RESULTAT BRUT **R**	RESULTAT D'ESSAI EN COMPRESSION **fc,cube (Annexe 4)**
0	0	0
7	18.3	16.8
28	30.42	28.92
60	30.19	28.69

Tableau 26 : Résultat d'essais en compression pour le béton B30 (Témoin)

TEMOIN		
JOURS	RESULTAT BRUT **R**	RESULTAT D'ESSAI EN COMPRESSION **fc,cube (Annexe 4)**
0	0	0
7	26.55	25.05
28	34.46	32.96
60	39.06	37.56

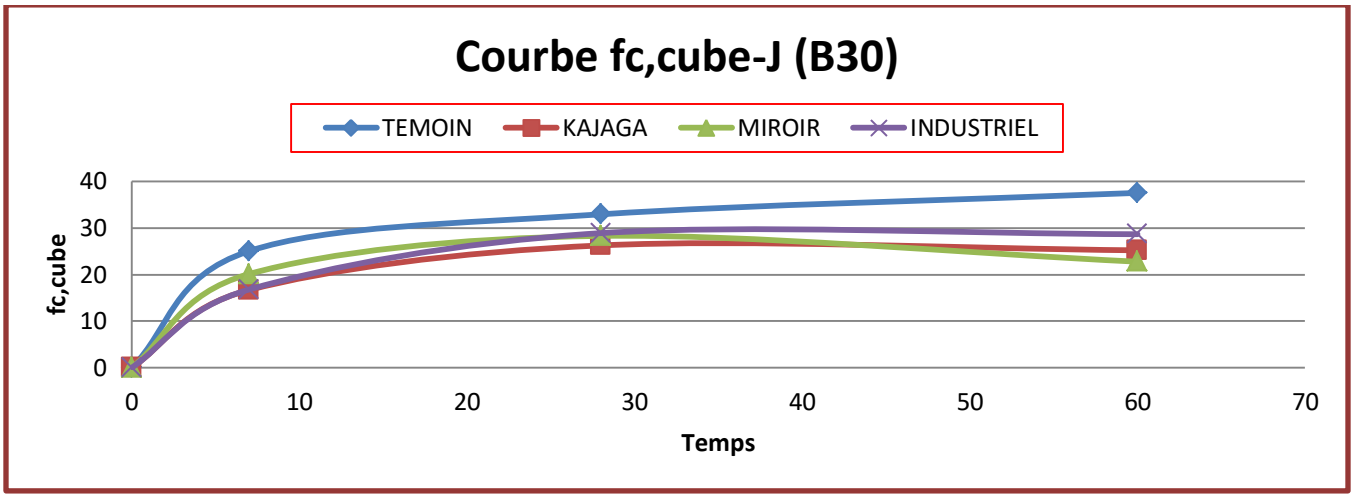


***Fig.30**. Courbe fc,cube en fonction du temps (B30)*

En observant les résultats, le constat est qu'aucun des éprouvettes, ayant subi une cure dans les eaux prélevées sur les trois sites, n'a atteint la résistance moyenne à 28 jours du béton B30 (même à 60 jours). Comme le montre le tableau suivant, elles ont subi au contraire une régression de classes de résistance.

Tableau 27 : Régression de classe de résistance à 60 jours (B30)

Sites	**fc,60 (Mpa)**	**Nouvelle désignation**	**Ancienne désignation**	**Régression de classe de résistance**
Kajaga	25.23	C 20/25 (60j)	B20	2 classes
Miroir	22.78	C 16/20 (60j)	B16	3 classes
Industriel	28.69	C 20/25 (60j)	B20	2 classes

Les résistances à la compression des trois sites, à différentes périodes (7j, 28j, 60j), présentent une certaine différence comparées à celles des éprouvettes témoins comme le montre les tableaux et les graphiques suivants.

Tableau 28 : Comparaison en % des résultats en fonction du béton de référence (B30)

	7j	28j	60j
Témoin	100	100	100
Kajaga	66.7	79.7	67.2
Miroir	80.4	85.9	60.7
Industriel	67.1	87.7	76.4

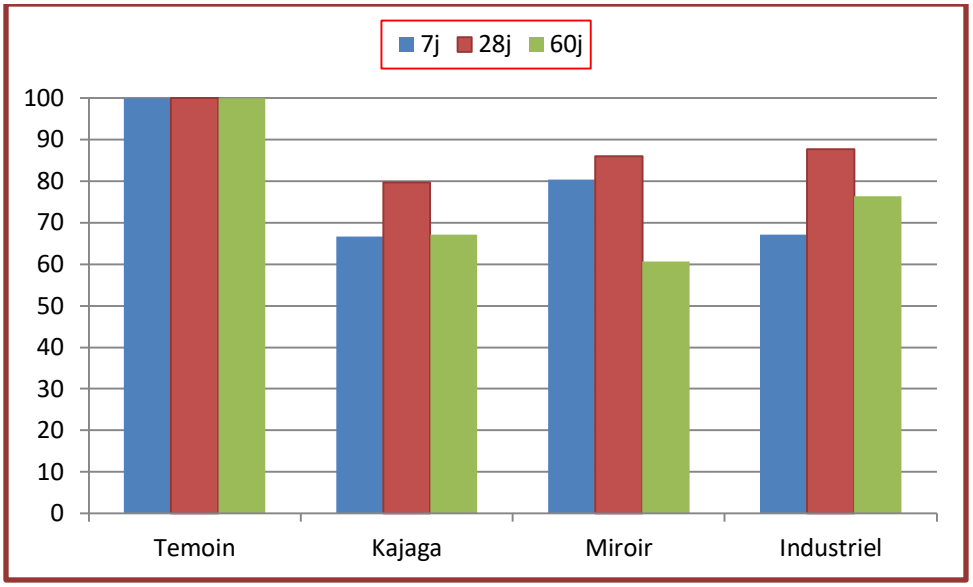


Fig.31. *Comparaison graphique des résultats en fonction des éprouvettes témoins(1) (B30)*

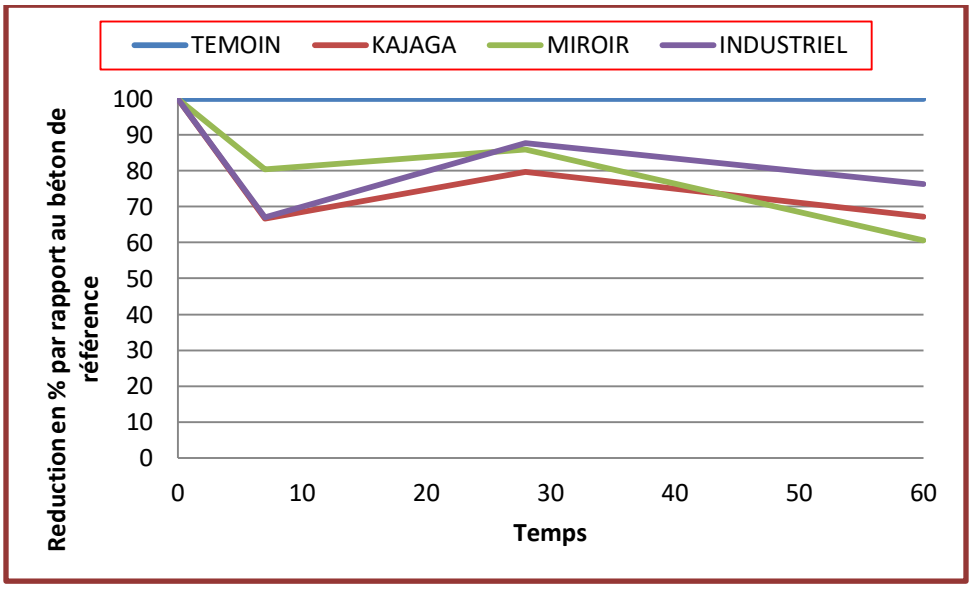


Fig.32*. Comparaison graphique des résultats en fonction des éprouvettes témoins(2) (B30)*

Tableau 29 : Réduction en pourcentage par rapport au béton de référence (B30)

Jours	Témoin	Kajaga	Miroir	Industriel
0	0	0	0	0
7	0	-33.33	-19.64	-32.93
28	0	-20.27	-14.08	-12.26
60	0	-32.83	-39.35	-23.62

Entre 7 et 28 jours, il y a augmentation de la résistance pour les éprouvettes des trois sites mais à partir de 28 jours, ces dernières subissent une diminution progressive de leurs résistances à la compression. Les éprouvettes ayant subi une cure dans l'eau du quartier Miroir sont celles dont la diminution est importante.

Pour les éprouvettes du quartier Miroir, cette diminution peut s'expliquer par l'acidité de ses eaux c'est-à-dire une probable attaque acide bactérienne (Dossiers CSTC, 2004) causée par les installations agricoles et industries entourant le quartier.

Pour les éprouvettes des quartiers Kajaga et Industriel, elles ont presque subies une même diminution qui peut être causée par une forte salinité des eaux du lac Tanganyika. En effet, un milieu aquatique est considéré salin lorsqu'il est chargé en sels minéraux les plus divers. Parmi les sels minéraux susceptibles de dissoudre les constituants calciques du béton, on peut citer les chlorures, nitrates et surtout les sulfates de sodium, de calcium ou de magnésium (CIM beton-Fiches techniques- Tome 3, Edition 2008).

En nous référant à l'**annexe 1**, il y a présence de tous ces sels minéraux précédemment évoqués,

Pour les essais de compression sur béton B40, les résultats sont les suivants :

Tableau 30: Résultat d'essais en compression pour le béton B40 (Kajaga)

KAJAGA		
JOURS	RESULTAT BRUT **R**	RESULTAT D'ESSAI EN COMPRESSION **fc,cube (Annexe 4)**
0	0	0
7	32.15	30.65
28	45.86	44.36
60	45.21	43.71

Tableau 31 : Résultat d'essais en compression pour le béton B40 (Miroir)

MIROIR		
JOURS	RESULTAT BRUT **R**	RESULTAT D'ESSAI EN COMPRESSION **fc,cube (Annexe 4)**
0	0	0
7	22.9	21.4
28	39.58	38.08
60	37.52	36.02

Tableau 32 : Résultat d'essais en compression pour le béton B40 (Industriel)

INDUSTRIEL		
JOURS	RESULTAT BRUT **R**	RESULTAT D'ESSAI EN COMPRESSION **fc,cube (Annexe 4)**
0	0	0
7	14.3	12.8
28	32.38	30.88
60	39.16	37.66

Tableau 33: Résultat d'essais en compression pour le béton B40 (Témoin)

TEMOIN		
JOURS	RESULTAT BRUT **R**	RESULTAT D'ESSAI EN COMPRESSION **fc,cube (Annexe 4)**
0	0	0
7	30	28.5
28	47.03	45.53
60	46.08	44.58

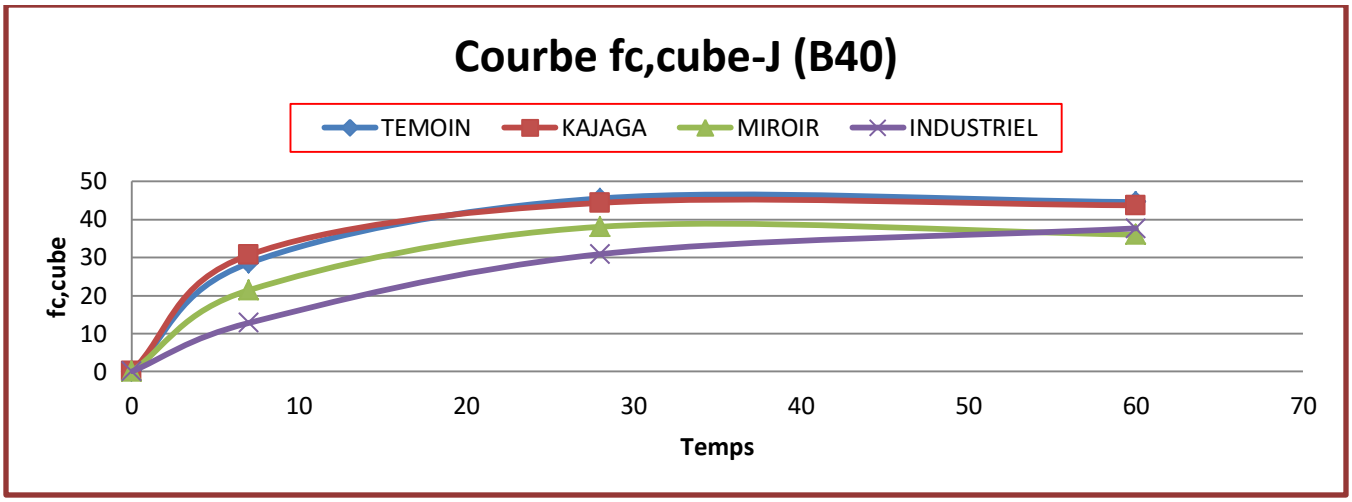


Fig.33. *Courbe fc,cube en fonction du temps (B40)*

Tableau 34: Régression de classe de résistance à 60 jours (B40)

Sites	fc,60 (Mpa)	Nouvelle désignation	Ancienne désignation	Régression de classe
Kajaga	43.71	C 30/37 (60j)	B30	2 classes
Miroir	36.02	C 25/30 (60j)	B25	3 classes
Industriel	37.66	C 30/37 (60j)	B30	2 classes

Tableau 35 : Comparaison en % des résultats en fonction du béton de référence (B40)

	7j	28j	60j
Témoin	100	100	100
Kajaga	107.5	97.4	98
Miroir	75.1	83.6	80.8
Industriel	45	67.8	84.5

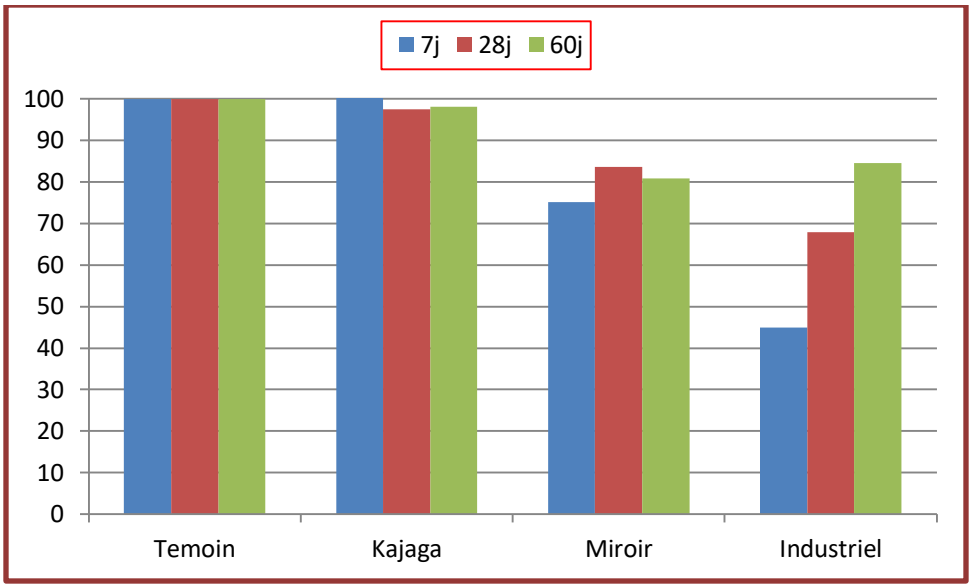


***Fig.34**. Comparaison graphique des résultats en fonction des éprouvettes témoins(1) (B40)*

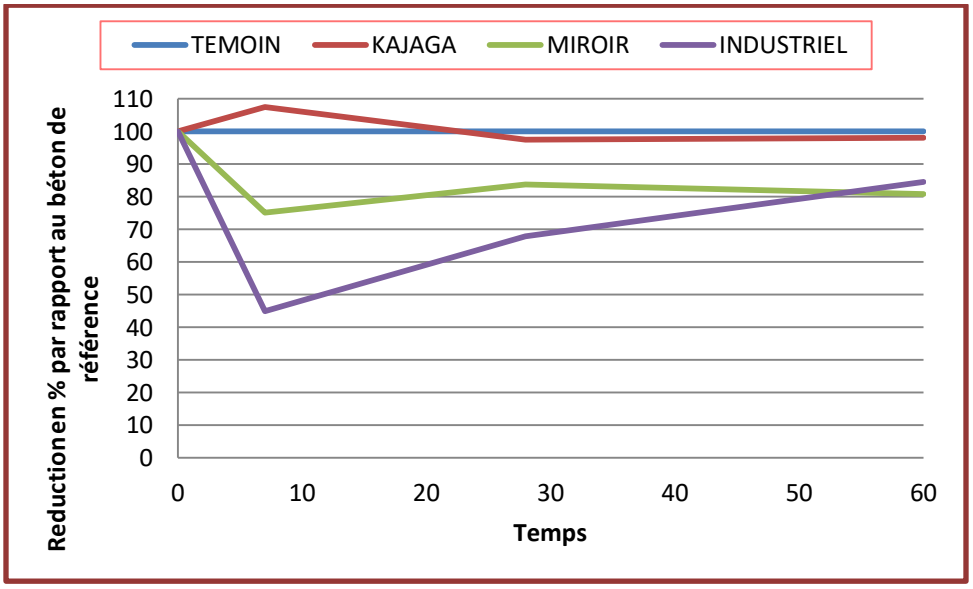


***Fig.35**. Comparaison graphique des résultats en fonction des éprouvettes témoins(2) (B40)*

En observant les résultats pour les essais de compression sur béton B40, le constat est que les éprouvettes du quartier Kajaga ont presque atteint la résistance moyenne à la compression à 28 jours du béton B40. En plus de cela, il y a une certaine stabilisation de la résistance même après 28 jours (pas de diminution significative).

Les éprouvettes du quartier Miroir n'ont pas non seulement atteint la résistance moyenne à la compression d'un béton B40, mais subissent également une petite diminution de résistance après 28 jours. L'explication peut être celle précédemment évoquée pour le béton B30.

Tableau 36 : Réduction en pourcentage par rapport au béton de référence (B40)

Jours	Témoin	Kajaga	Miroir	Industriel
0	0	0	0	0
7	0	7.54	-24.91	-55.09
28	0	-2.57	-16.36	-32.18
60	0	-1.95	-19.20	-15.52

Pour les éprouvettes du quartier Industriel, la résistance à la compression à 28 jours est assez petite mais il y a augmentation rapide après 28 jours (**Tableau 36**).

Bien que le béton B40 subisse une régression de classe de résistance pareille à celle du béton B30 (**Tableau 34**), il semble le mieux adapter pour les sites Kajaga et Industriel grâce à sa stabilité de résistance et une maturation continue après 28 jours.

V. CONCLUSION ET RECOMMENDATIONS

Le présent travail a porté sur l'effet de la remontée des eaux, de 3 sites d'étude, sur les structures en béton. Il ressort que le béton ne se comporte pas de la même façon vis-à-vis des eaux auxquelles il fait face. En effet, l'eau est un élément important à prendre en compte aussi bien pour son utilisation comme constituant du béton (eau de gâchage) mais aussi pour son impact lors de la maturation du béton.

En allant de l'hypothèse que l'eau de gâchage utilisée est de bonne qualité, nous avons constitué deux types de béton (B30 et B40) de classes de résistances différentes afin d'observer la variation de résistance en fonction des eaux auxquelles ils sont soumis après leurs prises.

Avec de l'eau de bonne qualité, le béton subit une maturation normale et complète. Tandis qu'avec les eaux prélevées sur les trois sites d'étude, on a remarqué qu'il y a soit un retard de maturation avant 28 jours, soit une diminution de résistance après 28 jours.

Malgré ces contraintes, le béton B40 semble le plus adapté pour résister à ces eaux malgré un retard de maturation observé pour le cure dans l'eau prélevée dans le quartier Industriel et une petite diminution de résistance pour le cure dans l'eau prélevée dans le quartier Miroir.

Ces contraintes peuvent être évitées par l'utilisation des accélérateurs dans le cas de retard de maturation. Pour ce qui est de l'attaque acide (quartier Miroir), elle peut être évitée par l'utilisation des matériaux de bonne qualité (choix correct du ciment, cure soignée du béton...etc.) ou une application d'un revêtement protecteur sur les parties susceptibles d'être en contact avec l'eau.

En conclusion, tous ces effets des inondations, peuvent être réglés en traitant le problème à la source, non pas pour protéger les structures en priorité (ce qui est aussi nécessaire) mais pour éviter les mêmes inondations. Les experts recommandent sur la variation du niveau des eaux du lac Tanganyika, le curage ainsi que l'élargissement du lit de la rivière Lukuga au niveau de sa source. Ils ont également recommandé d'assurer la protection des berges et des bassins des principales rivières qui se jettent dans le Lac. La cartographie des zones inondables tout le long du Lac Tanganyika, l'installation des canaux d'équilibre là où c'est nécessaire, la restriction d'attribution des parcelles et la restriction de construction dans ces zones, la construction d'un barrage de contrôle à l'embouchure du Lac Tanganyika qui jouerait un rôle de régulation de la baisse ou de la montée des eaux de ce Lac figurent parmi les recommandations de ces experts.

Les inondations du quartier Miroir peuvent être aussi évitées par un bon drainage des zones agricoles et industrielles, des réseaux d'assainissement suffisants et une sensibilisation sur la mise en œuvre individuelle de canaux de collecte d'eau dans chaque ménage.

RECOMMENDATIONS :

Bien que les résultats montrent une dégradation de la résistance du béton, les résultats auraient pu être plus précis si la cure des éprouvettes avait été effectuée in situ, pour une longue période (> 60 jours). En effet, le prélèvement, le transport et le stockage dégradent petit à petit les eaux. L'observation des éprouvettes sur une longue période permet non seulement d'évaluer les variations de leurs résistances mais aussi contempler leurs dégradations visuelles.

Aussi, les éprouvettes en béton auraient pu fournir des résultats fiables si on s'était procuré des constituants réels utilisés dans ces milieux d'étude (par exemple le sable de la rivière Mutimbuzi pour le site Kajaga). En plus de cela, il faudrait réaliser des essais in situ au scléromètre pour voir l'évolution de la résistance des structures existantes.

L'analyse chimique complète sur les différents saisons est aussi nécessaire afin d'avoir des données entières pour la détermination du dégrée d'exposition. Ceci pourrait être possible par une facilité d'accès (non payant) dans les laboratoires de la faculté des sciences. Un financement permettrait aussi d'étendre la zone d'étude pour arriver à une cartographie des zones inondables de la ville de Bujumbura.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[1] Lumami kapepepula et Muyisa Séverin, 2014 : « Analyse comparative des résultats physico chimiques des eaux du bassin versant nord-ouest du Lac Tanganyika ».

[2] Beauchamp, R. S. A., 1939: « Hydrobiology of Lake Tanganyika » International revue Der Gesamten Hydrobiologie und Hydrographie 39(316-353).

[3] Talling & Talling, 1965: « The chemical Composition of african Lake waters ».

[4] Alexandra Bertron, Marie Coutand, G Escadeillas et J Duchesne, 2005 : « Attaque chimique et biologique des effluents agricoles et agroalimentaires sur les matériaux cimentaires ».

[5] CIM béton (Centre d'information sur le ciment et ses applications): « Les applications des bétons (fiches techniques-tome 3)», Edition 2008.

[6] Dossiers CSTC (Centre scientifique et technique de la construction) - cahier n°9 – 4e trimestre 2004.

[7] Jean Rodier, Bernard Legube et Nicole Merlet., 2009 : « L'analyse de l'eau ».

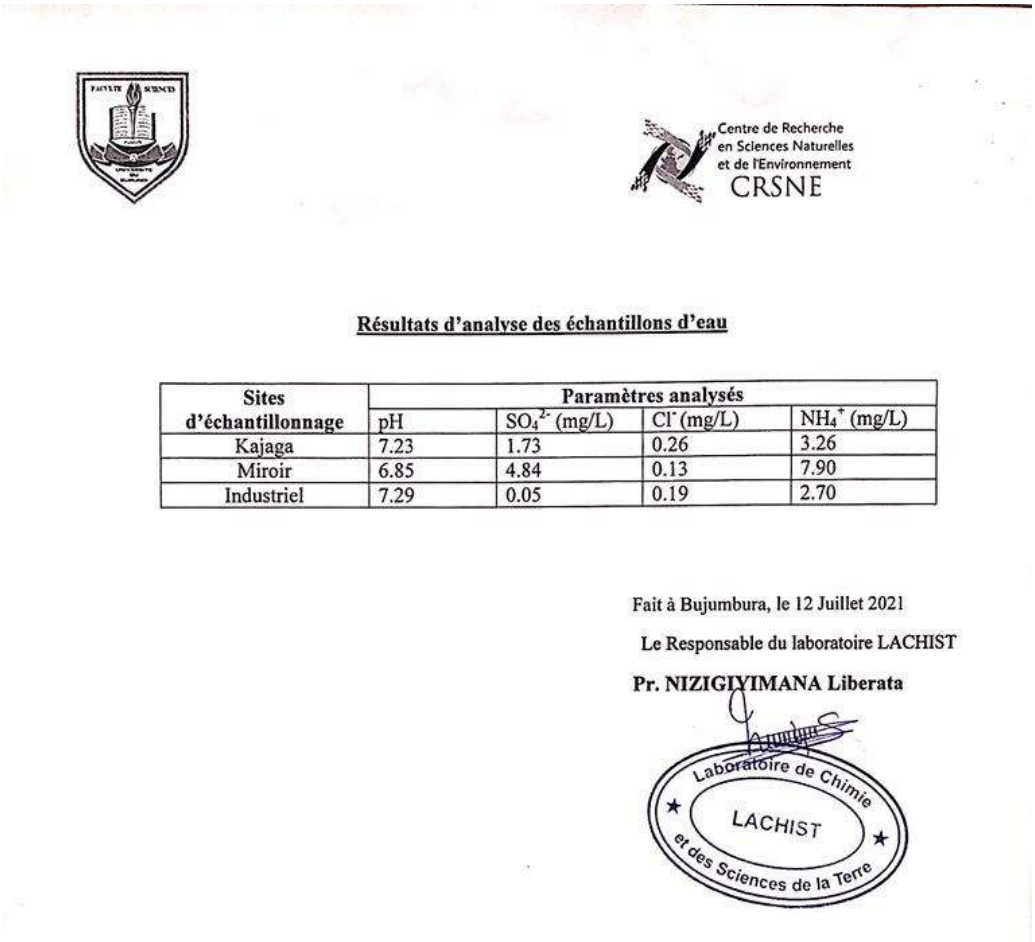
[8] Abbadi Fatima et Nebbou Khadidja, 2019 : « Formulation du béton à base des matériaux locaux (Granulats d'Aougroute) ».

ANNEXES

Annexe 1: Composition physico-chimique du lac Tanganyika

		(Talling & Talling) 1965 en ppm	(Craig) mmol/l	(Hecky 1978) mg/l	1986	1987	1988	1989	1990	(Ntakimazi 1995)	2002	2004	2009
T°	°C	-	-	-	26,6	26,6	26,4	25,9	26,2	24,5	27	26,7	27
pH		-	-	-	9	9	9,1	9,1	9,1	8,8	7,83	8,06	9,5
Cond	µS/cm	-	-	-	703	715	699	684	765	636	600	676	650
Alc TA	méq/l	-	-	-	-	-	-	-	-	6,1	0,6		1,79
TAC	méq/l	7	-	-	-	-	-	-	-	303,43	4,4	31,33	2,48
NO_3^-	mg/l	-	-	-	-	-	-	-	-	0,19	0,06	0,02	0,062
NO_2^-	mg/l	-	-	-	-	-	-	-	-	0	0,006	0,006	0,006
NH_4	mg/l	-	-	-	-	-	-	-	-	0,36	-	-	-
SO_4	mg/l	0,2	-	5,3	-	-	-	-	-	0,71	2	2	6
OD	mg/l	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5,14	6,95	7,2
Saturation	%	-	-	-	98,8	92,6	100	87,8	92,6	-	-	-	104,5
PO_4^{3-}	mg/l	-	-	-	-	-	-	-	-	0	0,01	0,03	0,45
Na	mg/l	2,5	2,7	61,7	-	-	-	-	-	-	-	-	-
K	mg/l	0,9	0,8	32	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Li	mg/l	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ca	mg/l	0,5	0,3	10,7	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Mg	mg/l	3,6	1,6	37,9	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Cl	mg/l	0,8	0,7	24,6	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SiO_2	mg/l	-	-	0,4	-	-	-	-	-	3,24	-	-	-
Cl	mg/l	-	-	-	-	-	-	-	-	26,83	-	-	-
Du. T	mg/l	-	-	-	-	-	-	-	-	10,1	63,7	35,8	20,76
Du. Ca	mg/l	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,72	6,8	6,08
Du. Mg	mg/l	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	14,67
Transparence	m	-	-	-	11,3	14,8	15,3	14,3	12,9	-	-	-	-

Annexe 2 : Rapport sur les analyses d'eau (Laboratoire LACHIST, Université du Burundi)



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

Résultats d'analyse des échantillons d'eau

Sites d'échantillonnage	Paramètres analysés			
	pH	SO_4^{2-} (mg/L)	Cl^- (mg/L)	NH_4^+ (mg/L)
Kajaga	7.23	1.73	0.26	3.26
Miroir	6.85	4.84	0.13	7.90
Industriel	7.29	0.05	0.19	2.70

Fait à Bujumbura, le 12 Juillet 2021

Le Responsable du laboratoire LACHIST

Pr. NIZIGIYIMANA Liberata

Laboratoire de Chimie et des Sciences de la Terre
LACHIST

Annexe 3 : Valeurs limites pour les classes d'exposition selon la norme SN EN 206

Caractéristique chimique	Méthode d'essai de référence	XA1	XA2	XA3
Eaux de surfaces et souterraines				
SO_4^{2-}, en mg/l	SN EN 196-2	≥ 200 et ≤ 600	> 600 et ≤ 3000	> 3000 et ≤ 6000
pH	ISO 4316	≤ 6.5 et ≥ 5.5	< 5.5 et ≥ 4.5	< 4.5 et ≥ 4.0
CO_2 agressif, en mg/l	SN EN 13577	≥ 15 et ≤ 40	> 40 et ≤ 100	> 100 jusqu'à saturation
NH_4^+, en mg/l	ISO 7150-1	≥ 15 et ≤ 30	> 30 et ≤ 60	> 60 et ≤ 100
Mg^{2+}, en mg/l	SN EN ISO 7980	≥ 300 et ≤ 1000	> 1000 et ≤ 3000	> 3000 jusqu'à saturation
Sol				
SO_4^{2-} mg/kg total	SN EN 196-2	≥ 2000 et ≤ 3000	> 3000 et ≤ 12 000	> 12 000 et ≤ 24 000
Acidité ml/kg	prEN 16502	> 200 Baumann-Gully	n'est pas rencontré dans la pratique	

Annexe 4 : Détermination de fc,cub à partir de R

Dimension des éprouvettes (mm)	Résistance à la compression correspondant à un cube
Cube 100 x 100	$f_{c,cub\ (150)} = 0,97 \times R_{cube\ (100)}$ ➤ si 50 MPa ≤ $R_{cube\ (100)}$
	$f_{c,cub\ (150)} = R_{cube\ (100)} - 1,5$ ➤ si $R_{cube\ (100)}$ < 50 MPa

Annexe 5 : Désignations des classes de résistance des bétons ordinaires

Anciennes désignations (Norme française)	Nouvelles désignations (Norme Eurocode)
B12	C12/15
B16	C16/20
B20	C20/25
B25	C25/30
B30	C30/37
B35	C35/45
B40	C40/50