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

Analyse chimique de quelques échantillons de ciment couramment utilisés au Burundi

Kubwimana, James; Sous la Direction de: Prof. Steve De Cliff

2024-04
UB, FS
https://repository.ub.edu.bi/handle/123456789/1044

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

UNIVERSITE DU BURUNDI

FACULTE DES SCIENCES

Département de Chimie

ANALYSE CHIMIQUE DE QUELQUES ECHANTILLONS DE CIMENT COURAMMENT UTILISES AU BURUNDI

Par :
James KUBWIMANA

Mémoire présenté et défendu en vue de l'obtention du Diplôme de Master en Sciences Chimiques

Spécialité : Contrôle et Analyses Chimiques

Sous la Direction de: Prof. Steve De Cliff

Bujumbura, Avril 2024

Analyse chimique de quelques échantillons de ciment couramment utilisés au Burundi

MEMBRES DU JURY

1. Professeur Godefroid GAHUNGU (Président du Jury)
2. Professeur Samuel BUNANI (Secrétaire)
3. Professeur Steve De Cliff (Directeur de Mémoire)
4. Docteur Léopold HAVYARIMANA (Membre)

DEDICACES

A ma très chère mère qui m'a toujours donné un magnifique modèle de labeur et de persévérance et à la mémoire de ma chère grand-mère.

A mes chers frères et sœurs,

A mes cousins et mes cousines,

A toute la famille Wilson et la famille Jean-Marie,

A ma meilleure amie Adèle MVUYEKURE

A tous mes ami (e) s,

A toutes les personnes qui m'ont encouragé tout au long de mes études,

Je dédie ce mémoire.

REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à remercier profondément Prof. Steve De Cliff, pour avoir accepté de diriger ce travail et qui m'a soutenu, encouragé et pour la confiance qu'il m'a accordée pendant toute la durée de ce travail.

Je remercie aussi Prof. Godefroid GAHUNGU pour m'avoir fait l'honneur de présider le jury de ce mémoire, ainsi qu'à tous les membres du jury que sont Prof. Samuel BUNANI et Dr. Léopold HAVYARIMANA. C'est en partie grâce à vos remarques et observations que ce mémoire a pu être amélioré.

Je tiens à remercier tous les enseignants du Département de Chimie qui ont contribué à notre formation, et leurs conseils fructueux durant toute la période de recherche, par le suivi régulier de l'avancement de nos travaux.

Je tiens également à remercier toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail. Je n'oublie pas bien évidemment mes camarades et je les remercie chaleureusement pour les agréables moments passés ensemble.

Je tiens enfin à remercier tout particulièrement ma famille qui m'a accordé la liberté d'action et la patience nécessaire pour réaliser ce travail ainsi que toutes les personnes qui m'ont soutenu.

Analyse chimique de quelques échantillons de ciment couramment utilisés au Burundi

RESUME

La mauvaise qualité du ciment a récemment été mise en cause comme étant les principales causes des effondrements incessants des bâtiments au Burundi. Cette étude a pour but d'analyser la composition chimique de quelque échantillons de ciment couramment utilisés au Burundi afin de déterminer leur conformité aux normes internationales et d'évaluer leur qualité.

Dans cette étude trois différentes marques de ciment provenant du marché Burundais ont été analysées à l'aide d'un spectromètre de fluorescence X (XRF) pour déterminer les constituants chimiques tels que l'oxyde de calcium, la silice, l'oxyde de magnésium, l'oxyde de fer et l'oxyde d'aluminium. Des propriétés telles que le facteur de saturation de chaux, le taux de silice et le module d'alumine ont été également calculées et la composition minéralogique a été déterminée en utilisant la formule de Bogue. Les résultats obtenus ont été comparés aux normes.

Les analyses de la composition chimique ont montré que les oxydes de calcium de tous les échantillons varient de **65,5% à 73,7%,** l'oxyde de silice varie de **12,467% à 16, 167%**, l'oxyde d'alumine varie de **3,04 % à 5,243%** et la teneur en oxyde de fer varie de **4,667% à 7, 497%.** Cependant l'oxyde de calcium du ciment GLC 42.5N est dans la plage de la norme à l'exception des ciments DANGOTE 42.5N et SIMBA 42.5N, leurs teneurs en CaO ont dépassé les limites. Les oxydes de silicium de tous les ciments ne sont pas conformes à la norme sauf les oxydes d'aluminium de tous les ciments restent dans les limites spécifiques. Quant aux oxydes de fer les ciments DANGOTE 42.5N et SIMBA 42.5N sont conformes à la norme à l'exception du ciment GLC 42.5N. Les résultats des paramètres de contrôle de la qualité ont montré que les valeurs de Facteur de Saturation de Chaux varient de **115,07% à 171,9 %,** Module de Silice varie de **1, 26% à 1,67%,** Module d'Alumine varie de **0,59%** à **0,69%. L**es raisons possibles de ces variations dans leurs compositions chimiques et leurs conséquences ont été discutées. Les valeurs potentielles de Bogue montrent de grandes différences pour le C_3S **(92,9% à 165%)** et C_2S **(-88,73% à -27,4%), d**es valeurs négatives ont été obtenues pour C_2S dans toutes les marques de ciment. Cela signifie que lors du chauffage du clinker, une partie du C_2S ait été convertie en C_3S .

Mots clés : ciment ; composition chimique ; composition minéralogique

Analyse chimique de quelques échantillons de ciment couramment utilisés au Burundi

SUMMARY

The poor quality of cement has recently been blamed as the main cause of incessant building collapses in Burundi. This study aims to chemically identify different types of cement commonly used in Burundi: case of three types of cements labeled DANGOTE 42.5N, SIMBA 42.5N et GLC 42.5N.

In this study, three different types of cement currently used on Burundi Market were analyzed using an X-ray fluorescence spectrometer (XRF) to determine the chemical constituents such as calcium oxide, silica, magnesium oxide, iron oxide and aluminum oxide, properties such as lime saturation factor, silica content and alumina modulus were also calculated and the mineralogical composition was determined using the Bogue's formula. The results obtained were compared to the standards.

The evaluation of the chemical composition showed that the oxides: calcium of all samples vary from 65.5% to 73.7%, silica oxide varies from 12.467% to 16.167%, alumina ranges from 3.04% to 5.243% and iron oxide content ranges from 4.667% to 7.497%. However, the calcium oxides in cement GLC 42.5N are within the range of the standard with the exception of cement DANGOTE 42.5N and SIMBA 42.5N their CaO contents have exceeded the limits. The silicon oxides of all cements do not comply with the standard except the aluminum oxides of all cements remain within the specific limits, as for the iron oxides cements DANGOTE 42.5N and SIMBA 42.5N comply with the standard with the exception of cement GLC 42.5N.

The results of quality control parameters showed that the values of Lime Saturation Factor range from 115.07% to 171.9%, Silica Modula ranges from 1.26% to 1.67% and Alumina Modula ranges from 0.59% to 0. .69%.

The possible reasons for these variations in their chemical compositions and their consequences were discussed. Bogue potential values show large differences for C_3S (92.9% to 165%) and C_2S (-88.73% to -27.4%), negative values were obtained for C_2S in all brands of cement, this means that when heating the clinker, part of the C_2S was converted into C_3S.

Keywords: cement; chemical composition; mineralogical composition

TABLE DES MATIERES

MEMBRES DU JURY i

REMERCIEMENTS iii

RESUME iv

SUMMARY v

TABLE DES MATIERES vi

LISTE DES ABREVIATIONS viii

LISTE DES FIGURES ix

LISTE DES TABLEAUX ix

AVANT-PROPOS x

CHAPITRE I : INTRODUCTION GENERALE 1

I.1. Contexte et problématique du sujet 1

I.2. Objectifs et intérêt du sujet 3

CHAP II : REVUE DE LA LITTERATURE SUR LE CIMENT 5

II.1. Définition et historique 5

II.2. Constituants et fabrication du ciment 5

II.2.1. Étape de formation de la chaux ou calcination 5

II.2.2. Étape de formation du clinker ou clinkérisation 6

II.2.3. Constituants majeurs du ciment et leur formation 6

II.3. Procédé de fabrication du ciment 8

II.4. Composition minéralogique du clinker 10

II.5. Additifs 11

CHAPITRE III : MATERIELS ET METHODES 12

III.1. Echantillonnage 12

III.2. Équipements d'analyses 12

III.3. Analyse par le spectromètre de fluorescence à rayons X 12
III.3.1. Introduction 12
III.3.2. Principe 13
III.4. Méthodes d'analyses chimiques 13
III.4.1. Composition chimique par spectrométrie de fluorescence X 13
III.4.2. Préparations des pastilles des échantillons 14
III.5. Calcul des paramètres d'indice de la qualité 14
III.5.1. Le Facteur de saturation de chaux (LSF) 14
III.5.2. Le module de silice (MS) 15
III.5.3. Le Module d'alumine (MA) 15
III.6. Détermination de la composition minérale par calcul de Bogue 15
III.7. Présences d'autres substances d'influences de qualité 16
CHAPITRE IV : RESULTATS D'ANALYSE ET DISCUSSION 18
IV.1. Composition en oxydes des ciments analysés 18
IV.2. Composition minérale des ciments analysés 21
IV. 3. Résultats de calcul d'indice de la qualité 24
CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS 28
REFERENCES 30

LISTE DES ABREVIATIONS

XRF : La spectrométrie de fluorescence des rayons X

EAS : East African Standard

ASTM : American Society for Testing and Materials

FDUS : Final Draft Uganda Standard

MS : Module de silice

MA : Module d'alumine

LSF : Lime saturation Factor

GLC : Great Lake Cement

RDC : République Démocratique du Congo

BBN : Bureau Burundais de Normalisation et Contrôle de la Qualité

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Composition du clinker **(**Mizab, 2020) 6
Figure 2: Eléments qui entrent dans le procédé de fabrication de ciment 9
Figure 3: Etapes de la fabrication du ciment (Eddine, 2020) 10
Figure 4: Spectromètre de Fluorescence à Rayon X marque RIGAKU Supermini20. 13
Figure 5: Presse Hydraulique marque MP250 14
Figure 6: Composition en oxydes de différents échantillons de ciments..... 19
Figure 7: Pourcentage de silicate tricalcique de trois échantillons de ciment. 21
Figure 8: Pourcentage de silicate dicalcique de trois échantillons de ciment. 22
Figure 9: Pourcentage d'aluminate tricalcique de trois échantillons de ciment 23
Figure 10: Pourcentage d'alumino-ferrite tetra calcique de trois échantillons de ciment 24
Figure 11: Valeurs de LSF, de différents échantillons de ciment. 25
Figure 12: Valeurs de MS, de différents échantillons de ciment 26
Figure 13: Valeurs de MA, de différents échantillons de ciment 27

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Composition minéralogique du clinker..... 10
Tableau 2: Composition en oxydes des différents échantillons de ciment étudiées 18

AVANT-PROPOS

Le ciment est l'un des matériaux de construction les plus couramment utilisés dans le domaine de la construction au monde entier, jouant un rôle essentiel dans la résistance et la durabilité des structures**.** Au Burundi, l'utilisation du ciment demeure importante, notamment dans la construction de bâtiments, de routes et d'ouvrages d'art.

Cependant que la mauvaise qualité du ciment entraîne des problèmes potentiels tels que les défaillances structurales, une durée de vie réduite des bâtiments et une inefficacité des matériaux de construction.

Ce travail est réalisé dans le cadre d'un mémoire de fin d'étude en vue d'obtenir le diplôme de Master en Sciences Chimiques, Spécialité : Contrôle et Analyse Chimique. Il a pour objectif de faire l'analyse de la composition chimique de quelques échantillons de ciment couramment utilisés au Burundi afin de déterminer leur conformité par rapport aux normes internationales et ainsi d'évaluer leur qualité.

Les résultats de cette étude permettront de mieux comprendre les caractéristiques de ces ciments et d'identifier d'éventuelles différences par rapport aux normes internationales. Cela contribuera à l'amélioration de la construction au Burundi et au renforcement de la sécurité des bâtiments.

CHAPITRE I : INTRODUCTION GENERALE

I.1. Contexte et problématique du sujet

Le ciment est l'un des matériaux de construction les plus couramment utilisés dans le domaine de la construction au monde entier, jouant un rôle essentiel dans la résistance et la durabilité des structures (Guillon, 2007 ; Sultan et al., 2023). C'est un matériau qui lie des corps solides (agrégats) en durcissant à partir d'un état plastique. Un ciment fonctionne en formant une pâte plastique lorsqu'il est mélangé avec de l'eau, ce qui développe la rigidité (ensembles) et augmente ensuite progressivement la résistance à la compression (durci) par réaction chimique avec l'eau (hydratation) (Salah, 2019).

Au Burundi comme ailleurs, le ciment est un élément clé du secteur de la construction, qui connaît une croissance rapide pour répondre aux besoins croissants en logements, en infrastructures et en développement économique (Babikian, 2019). De grandes quantités de ciments sont utilisées dans les travaux de construction, la plupart des sociétés de construction s'appuient sur l'expérience, la disponibilité et le coût pour sélectionner la marque de ciment à utiliser dans leurs projets (Elbagermia et al., 2014). Soulignons cependant que la mauvaise qualité du ciment entraîne des problèmes potentiels tels que les défaillances structurales, une durée de vie réduite des bâtiments et une inefficacité des matériaux de construction (Olonade, 2015; Akanni et al, 2014).

La qualité du ciment dépend de la composition chimique de ses constituants, qui jouent un rôle important dans la prévention de ses défaillances (Stutzman et al., 2014). Mais comme les qualités diffèrent d'un ciment à un autre, chaque pays ou région se convient alors sur une plage de qualité, appelée « norme de qualité » (ou standards en anglais). Celle-ci est exprimée sous forme de quantité souvent exprimée en pourcentage pour chacun des constituants chimiques ou oxydes dits « majeurs » du ciment. L'interprétation des données d'une norme est souvent complexe et ne suffit pas, à elle seule, pour juger de la qualité du ciment en l'absence des données sur l'étude de durabilité du ciment considéré (étude de la résistance mécanique).

Par exemple, une ou deux valeurs hors normes pour un oxyde majeur ne signifie pas nécessairement que le ciment en question est mauvais, et par conséquent à rejeter. Il existe d'autres paramètres de contrôle de la qualité du ciment appelés « paramètres d'indice de la qualité », qui sont souvent tenus compte. Ces paramètres ont été établis sous forme de proportions de certains oxydes majeurs par rapport aux autres oxydes majeurs présents dans le ciment. Il en existe trois, à savoir le facteur de saturation de la chaux (LSF : lime saturation factor), le module de silice (MS) et le module d'alumine (MA). Outre la composition chimique, la qualité du ciment dépendra aussi de sa composition minérale, souvent évaluée par une série de calculs utilisant la formule dite « formule de Bogue.

Dans le ciment, les oxydes majeurs ou les minéraux ne sont pas seuls présents. Dans presque tous les ciments, on observe des substances en très faibles quantité qu'on trouve dans le ciment et qui l'affecte plus ou moins positivement ou négativement. C'est le cas de la présence de l'oxyde de titane (TiO_2) dont la présence dans le ciment en certaines proportions constitue un avantage pour la qualité du ciment en termes de valeur ajoutée.

Enfin, et en dernier ressort, la qualité du ciment est déterminée par des données de résistance mécanique.

Les ciments commercialisés au Burundi proviennent de la production nationale par la cimenterie BUSECO et des importations en provenance des pays voisins et d'autres régions. On trouve donc sur le marché burundais toute une gamme de ciments provenant de sources variées comme le ciment DANGOTE produit par la multinationale nigériane Dangote Industries Limited, le ciment SIMBA produit par la société Tanga Cement PLC basée en République Unie de Tanzanie, la société chinoise Great Lakes Cement (GLC) opérant en République Démocratique du Congo, etc. Cette diversification des sources d'approvisionnement offre des avantages en termes d'approvisionnement adéquat, mais peut également présenter des défis en matière de surveillance de la qualité des ciments. Au Burundi, la surveillance des normes de qualité en vue de prévenir des accidents et catastrophes résultant de l'utilisation ou la consommation des produits commercialisés au Burundi est assurée par le Bureau Burundais de Normalisation et de Contrôle de la Qualité (BBN). De ce fait, la BBN relève du ministère ayant le commerce dans ses attributions.

En matière de ciment, la BBN utilise la norme EAS 18-1 :2001 de l'EAC (East African Community).

En septembre 2020, la BBN a suspendu temporairement le ciment GLC produit en RDC, que la BBN en raison de problèmes de qualité et de non-conformité aux normes de construction. Pourtant, selon le représentant de Musumba Cement et de Napcom, deux importateurs de ciments basés à Bujumbura, des échantillons de ce ciment avaient été analysés par le laboratoire d'analyse de l'OBUHA et avaient été jugés favorable quant à la qualité de ce ciment. Mais selon le Directeur Général, « GLC a falsifié les résultats des données de son ciment dans une tentative de démontrer à ses clients que son ciment est de très bonne qualité » (IWACU, 2020 ; ABP, 2020).

Cette problématique soulève une série de questions, toutes en rapport avec la norme utilisée par la BBN en matière de la commercialisation du ciment au Burundi. S'il semble évident que le Burundi n'a pas sa norme propre en matière de ciment, quelle autre norme serait-elle mieux indiquée pour protéger les consommateurs burundais ?

I.2. Objectifs et intérêt du sujet

Au regard de ce qui précède, nous avons envisagé cette étude intitulée « Analyse chimique de quelques échantillons de ciments couramment utilisés au Burundi ». Les ciments analysés sont, d'une part le ciment incriminé GLC 42.5N, le ciment DANKOTE 42.5N considéré généralement considéré de haute qualité dans l'opinion, ainsi que le ciment SIMBA 42.5N en provenance de la Tanzanie. En l'absence d'une norme spécifique au Burundi, la norme de comparaison utilisée pour l'analyse des résultats de cette étude est la norme EAS 18-1 :2001 de l'EAC (East African Community).

L'objectif principal de ce travail consistait alors à faire l'analyse de la composition chimique de quelques échantillons de ciment couramment utilisés au Burundi afin de déterminer leur conformité par rapport aux normes internationales et ainsi d'évaluer leur qualité.

Pour atteindre cet objectif, les objectifs spécifiques suivants ont été préconisés :

- Analyser la composition chimique en oxydes par Spectrométrie de Fluorescence à Rayons X,
- Déterminer la composition minérale par « Calculs de Bogue »
- Calculer des paramètres de contrôle de la qualité ;
- Comparer les résultats obtenus avec les spécifications des normes en vigueur pour évaluer la conformité des ciments testés.

En réalisant ces objectifs, nous souhaitons sensibiliser l'autorité de normalisation sur la nécessité de la mise en place d'une norme sur le ciment spécifique ou adaptée aux conditions de construction propres au Burundi, en vue d'améliorer la qualité et la durabilité des structures construites au Burundi en sélectionnant des ciments de haute qualité, en garantissant la conformité aux normes et en identifiant et en corrigeant les problèmes de qualité éventuels.

CHAP II : REVUE DE LA LITTERATURE SUR LE CIMENT

II.1. Définition et historique

Le ciment est un liant, une substance utilisée dans la construction qui prend, durcit et adhère à d'autres matériaux, les liants ainsi entre eux (Yalamarty, 2018, Faleye et al., 2009) . La compréhension du comportement du ciment peut conduire à la conception de bétons et de mortiers de haute performance pour réaliser des structures solides et durables (Almabrok & al, 2019).

Historiquement, le ciment a été inventé par les Romains en mélangeant la chaux et la pouzzolane. Les chercheurs ont longtemps étudié la composition de ces roches dont les propriétés hydrauliques sont remarquables. La première tentative de fabrication de la chaux et la première utilisation du nom ciment date de 1756 (Newman, John, 2003).

Les premiers travaux sur les véritables ciments remontent à 1796 et sont dus à l'Anglais PARKE qui a pris un brevet pour la fabrication d'un ciment Romain qui était un véritable ciment prompt (Kurdowski, 2014). C'est seulement en 1845 que l'Anglais Johnson indiqua les règles de fabrication de ce produit.

A la fin du XIX^{e} siècle, en France, Le Chatelier étudia la composition chimique des divers constituants des ciments; son œuvre fut perfectionnée et achevée par l'Américain Bogue au XX^{e} siècle.

II.2. Constituants et fabrication du ciment

II.2.1. Étape de formation de la chaux ou calcination

La réaction chimique de base à la fabrication du ciment commence avec la décomposition du carbonate de calcium ($CaCO_3$) en oxyde de calcium (CaO, chaux) accompagnée d'un dégagement de gaz carbonique (CO_2), à environ 900 °C. C'est l'étape dite de « calcination ». La résistance du ciment augmente en cas d'augmentation du pourcentage de CaO lié, cependant, la stabilité chimique diminue en milieu agressif. La teneur de CaO est de 63% à 67% dans le clinker dont il est la composition principale.

II.2.2. Étape de formation du clinker ou clinkérisation

Le produit de calcination est mélangé avec l'argile composé essentiellement de silice (SiO_2), de l'alumine (Al_2O_3) et de l'oxyde ferreux (Fe_2O_3) suivi d'une cuisson pendant laquelle l'oxyde de calcium réagit à une haute température (en général de 1200 à 1500°C) avec la silice, l'alumine et l'oxyde ferreux pour former des silico-aluminates de calcium composant le « clinker ». Cette étape dite de clinkérisation aboutit à la formation d'un clinker.

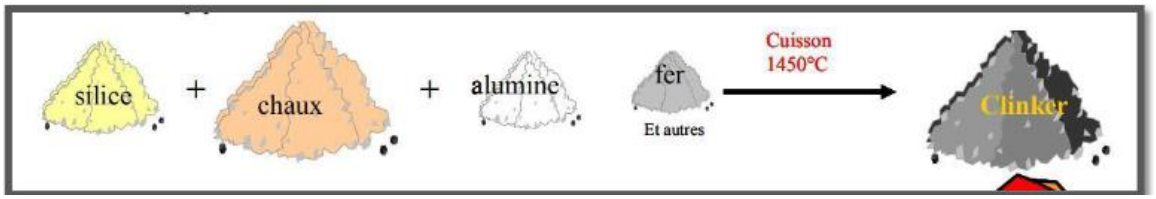


Figure 1: Composition du clinker (Mizab, 2020)

II.2.3. Constituants majeurs du ciment et leur formation

Chimiquement, la formation des constituants du clinker s'effectue en quatre étapes :

a) Formation du silicate tricalcique (Alite C_3S)

$$3CaO+SiO_2 \rightarrow 3CaO,\ SiO_2 \xrightarrow{\text{à } \mathbf{1220°c}} \mathbf{C_3S}$$

Le silicate tricalcique est le minéral le plus important du clinker étant donné qu'il confère au ciment la plus grande partie de sa résistance (Taylor, 1997).

b) Silicate dicalcique (Bélite C_2S)

$$2CaO+\ SiO_2 \rightarrow 2CaO,\ SiO_2 \xrightarrow{\text{à } \mathbf{1220°c}} \mathbf{C_2S}$$

Dans cette réaction la silice (SiO_2) réagit avec CaO pour donner des silicates de calcium ; un pourcentage élevé donne beaucoup de C_2S parce qu'il réagit avec tout le CaO, dans ce cas le ciment durci lentement, sa résistance augmente à long terme.

Le silicate dicalcique intervient positivement dans les résistances du ciment à 7 et 28 Jours d'âge à un degré moindre que C_3S toute fois (Frideric, 2014)

c) Aluminate tricalcique (Célite C_3A)

$$3CaO+Al_2O_3 \rightarrow 3CaO, Al_2O_3 \xrightarrow{\text{à } \mathbf{1450°c}} \mathbf{C_3S}$$

Il contribue à la prise et au durcissement rapide du ciment, cependant, une haute teneur en Al_2O_3 donne un ciment très sensible à la corrosion sulfatée, sa teneur est de 4 à 7%. Les aluminates tricalciques sont des constituants qui possèdent la prise la plus rapide et la chaleur d'hydratation la plus élevée. Il joue un rôle important dans la résistance à court terme et la tenue du ciment à certains milieux agressifs. Il forme avec l'alumino -ferrite tétra calcique ce que l'on appelle la masse interstitielle du clinker **(**Abdelwahhab, 2022,) **.**

d) Alumino-ferrite tétra calcique (C_4AF)

$$4CaO+Al_2O_3+Fe_2O_3 \rightarrow 4CaO, Al_2O_3, Fe_2O_3 \xrightarrow{\text{à } \mathbf{1450°c}} \mathbf{C_4AF}$$

La ferrite Fe_2O_3 joue le rôle de fondant en favorisant l'eutectique lors de la cuisson du mélange cru. Il diminue considérablement la température de cuisson du clinker et contribue à l'augmentation de la stabilité chimique dans les eaux sulfatées, sa teneur est de 2.5% à 4% (Bayouli, 2016).

e) **Composants chimiques mineurs (Eddine, 2020)**

Outre les composants chimiques majeurs que nous venons de voir, le ciment contient des composants mineurs mais dont le rôle peut être décisif pour la qualité du ciment.

- **Magnésie (MgO):**

Une quantité élevée en MgO à l'état libre sous forme de périclase, provoque l'augmentation de volume lors de l'hydratation; sa teneur est inférieure à 5%.

- **Soufre (SO_3):**

Le soufre du clinker provient essentiellement du combustible tel que le coke ou le charbon et des matières premières comme l'argile et le schiste où il se manifeste sous forme de pyrite, de sulfate ou de composé organique. La présence de soufre réduit la volatilité des alcalis pendant le clinkerisation.

- **Alcalis (Na_2O et K_2O) :**

Une partie des alcalis se volatilise lors de la cuisson, sa composition est de 0.5 à 1%. Les alcalis provoquent la diminution de la résistance du ciment, parce qu'ils ralentissent l'hydratation des principaux minéraux.

La silice, l'alumine et le fer donnent à la cuisson un caractère acide, contrairement à la chaux qui est plutôt basique. Ces proportions permettent de prévoir les qualités ultérieures du ciment.

Les oxydes dans le clinker doivent être liés en composés définis appelés minéraux.

II.3. Procédé de fabrication du ciment

Le clinker ainsi obtenu est ensuite broyé et mélangé à du gypse et à d'autres constituants ce qui permet d'obtenir le ciment proprement dit (Samia, 2010). Le Gypse ($CaSO_4.2H_2O$) est une espèce minérale composée de sulfate di-hydraté de calcium de formule $CaSO_4 \cdot 2H_2O$. Le mot gypse désigne ainsi à la fois une espèce chimique et une roche.

Le gypse est actuellement reconnu comme un composant important et essentiel du ciment dit « portland » parce qu'il règle la prise, augmente la résistance, améliore la stabilité de volume et facilite la mouture. Les deux formes de gypse pour la fabrication du ciment sont la forme hydratée (gypse) $CaSO_4\ 2H_2O$ et la forme anhydre (anhydride) $CaSO_4$, naturelle ou obtenue par déshydratation complète du gypse dans un four rotatif (Dounia, 2022). La figure qui suit résume les groupes d'éléments qui entrent dans la composition du ciment.



Figure 2: Eléments qui entrent dans le procédé de fabrication de ciment

La fabrication du ciment est un procédé complexe qui exige un savoir-faire, une maîtrise des outils et des techniques de production, des contrôles rigoureux et continus de la qualité (Eddine, 2020).

Ce procédé comporte les étapes de fabrication suivantes :

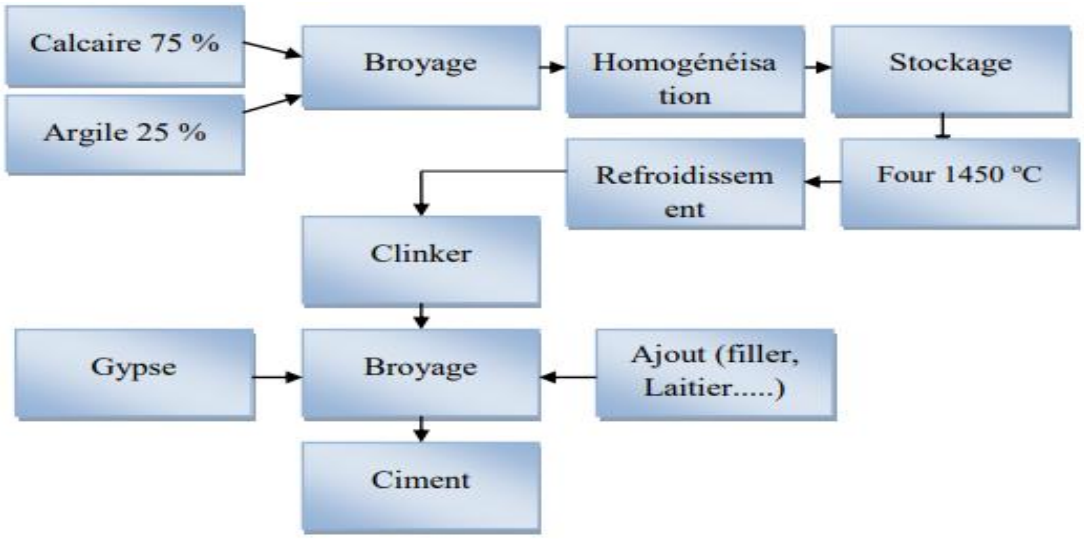


Figure 3: Etapes de la fabrication du ciment (Eddine, 2020)

II.4. Composition minéralogique du clinker

Tableau 1: Composition minéralogique du clinker

Composés	**Notation chimique**	**Notation du cimentier**	**Taux %**
Silicate tricalcique ou alite	$3CaO, SiO_2$	C_3S	45-65
Silicate bicalcique ou bélite	$2CaO, SiO_2$	C_2S	15-35
Aluminate tricalcique ou célite	$3CaO, Al_2O_3$	C_3A	4-14
Aluminoferrite tétracalcique	$4CaO, Al_2O_3, Fe_2O_3$	C_4AF	10-18

II.5. Additifs

Les additifs sont ajoutés pour améliorer les propriétés du ciment. La quantité totale des additifs doit être inférieure ou égale à 1 % de la masse de ciment. La proportion des additifs organiques, sous forme d'extrait sec, doit être inférieure ou égale à 0,5 % de la masse de ciment. L'additif le plus courant est l'agent de mouture qui permet d'augmenter le débit des broyeurs (FDUS EAS 18-1, 2018)

CHAPITRE III : MATERIELS ET METHODES

III.1. Echantillonnage

Les échantillons de différentes marques de ciment disponibles sur le marché Burundais ont été achetés par des points de vente en Mairie de Bujumbura (Quartier Asiatique). Notre étude a porté sur les ciments DANGOTE 42.5N, SIMBA 42.5N et GLC 42.5N. Tous les échantillons de ciment ont été collectés à partir des sacs neufs, c'est-à-dire n'ayant pas été préalablement ouvert. Les échantillons ont été acheminés dans le laboratoire de l'OBM où des pastilles ont été fabriqués et leurs compositions chimiques analysées par spectroscopie de fluorescence à rayon X (XRF) à l'aide d'un spectromètre séquentielle de paillasse de marque Supermini200 de Rigaku.

III.2. Équipements d'analyses

Les équipements utilisés dans cette étude sont :

- La balance analytique;
- Le broyeur de marque ROCK LABS;
- L'homogénéisateur électrique de marque GLEN CRESTON MIXER, MILL 8000M;
- La presse hydraulique de marque MP 25;
- Le Spectromètre de fluorescence à rayon X de marque RIGARU Super mini 200.

III.3. Analyse par le spectromètre de fluorescence à rayons X

III.3.1. Introduction

La spectrométrie de fluorescence X est une technique d'analyse élémentaire globale permettant d'identifier et de déterminer la plupart des éléments chimiques qui composent un échantillon. Cette technique peut être utilisée pour des matériaux très variés : minéraux, céramiques, ciments, métaux, huiles, eau, verres... sous forme solide ou liquide. (Thirion-merle & Lyon, 2015,Fatima & Hakima, 2014, Bouregaya, 2018)



Figure 4: Spectromètre de Fluorescence à Rayon X marque RIGAKU Supermini200

III.3.2. Principe

Lorsqu'un échantillon est bombardé par un rayonnement primaire émis par une source d'excitation énergétique, un ou plusieurs électrons peuvent être éjectés de leurs orbitales atomiques (ou couches électroniques). Ainsi, un électron d'une couche électronique supérieure vient remplacer l'électron éjecté et libère à son tour de l'énergie sous forme de rayons X (Rufin, 2016).

Ce rayonnement secondaire constitue le phénomène de « Fluorescence ». Chaque élément chimique est caractérisé par un spectre de fluorescence X spécifique.

L'analyse de ce spectre permet d'identifier les éléments présents dans un échantillon et de déterminer leurs concentrations. Pour faire des analyses avec les Rayons X, on utilise des pastilles.(Abdellah, Djermane, 2021; Bayouli, 2016).

III.4. Méthodes d'analyses chimiques

III.4.1. Composition chimique par spectrométrie de fluorescence X

La spectrométrie à fluorescence de rayons X (XRF) peut effectuer l'analyse élémentaire d'une large gamme de matériaux tels que les solides, les liquides et les poudres libres (Boutahar, 2014). Cette fluorescence, perpendiculaire au faisceau primaire, se difracte alors sur un cristal analyseur selon la loi de Bragg. Les éléments concernés sont : SiO_2, Fe_2O_3, Al_2O_3, CaO, MgO, K_2O, Na_2O, P_2O_5, SO_3 etc...(Amal, 2021, Loubna, 2022).

III.4.2. Préparations des pastilles des échantillons

Pour préparer la pastille, nous avons pèse 8g de chaque échantillons soigneusement broyé et ajouté 2g de Wax et on met le mélange dans le tube caubère. Ce tube contenant le mélange est mis dans un homogénéisateur électrique (marque GLEN CRESTON MIXER, MILL 800 M) et agité pendant 5 min afin que l'échantillon et le Wax soient bien homogénéisés. Ensuite nous avons versé le mélange dans le moule à pastilles et pressé par une presse hydraulique MP250 à 20 tonnes /cm^3. Le spectromètre de fluorescence aux rayons X analyse automatiquement les pastilles d'échantillons un par un dans la cellule d'analyse.



Figure 5: Presse Hydraulique marque MP250

III.5. Calcul des paramètres d'indice de la qualité

Les paramètres de contrôle du ciment ont été calculés sur base des concentrations d'oxydes des ciments étudiés en utilisant les équations ci-dessous.

III.5.1. Le Facteur de saturation de chaux (LSF)

Le facteur de saturation de la chaux est une mesure du degré de conversion de la silice, de l'alumine et de l'oxyde de fer en chaux correspondante et peut être calculé à l'aide de la formule (Sanusi Nuhu1 et al., 2020)

- $\text{LSF} = \frac{CaO}{2.8SiO2+1.65\ Al_2O_3+0.35Fe_2O_3} * 100$, Si MA> 0,64
- $\text{LSF} = \frac{\text{CaO}}{2.8\text{SiO2}+1.18Al_2O_3+0.7Fe_2O_3} * 100$, Si MA< 0,64

III.5.2. Le module de silice (MS)

Il renseigne sur le rapport entre la quantité de silicate (provenant de SiO_2) et celle d'aluminate (provenant d'Al_2O_3 et de Fe_2O_3) contenus dans le ciment ou le clinker (Harrisson, 2019).

$$MS = \frac{SiO2}{Al_2O_3 + Fe_2O_3}$$

III.5.3. Le Module d'alumine (MA)

C'est le rapport entre la quantité d'alumine et l'oxyde de fer. Il concerne particulièrement le mélange cru qu'on va cuire. Il renseigne sur l'aptitude du mélange à la cuisson car l'oxyde de fer est un fondant, donc plus le mélange est riche en fer, plus il sera facile à cuire mais il sera moins résistant (Frideric, 2014).

$$MA = \frac{Al_2O_3}{Fe_2O_3}$$

III.6. Détermination de la composition minérale par calcul de Bogue

La composition théorique des phases principales du ciment peut être calculée à partir d'une composition chimique faite en fluorescence X en utilisant les équations de Bogue (Inam et al. 2022; A.Tazuddin et al, 2017) . A partir de la composition chimique et des valeurs des modules du clinker ou du ciment, on peut calculer la composition minéralogique en utilisant les formules de BOGUE (Lanto, 2013).

L'équation ci-dessous est valable pour **A /F ≥ 0.64** (Inam et al., 2022)

$C_3S = (4,0710)\,CaO - (7,6024)\,SiO_2 - (1,4297)\,Fe_2O_3 - (6,7187)\,Al_2O_3 - (2,852)\,SO_3$

$C_2S = (8,6024)\,SiO_2 + (1,0785)\,Fe_2O_3 + (5,0683)\,Al_2O_3 - (3,0710)\,CaO$

$C_3A = (2,6504)\,Al_2O_3 - (1,6920)\,Fe_2O_3$

$C_4AF = (3,0432)\,Fe_2O_3$

Théoriquement tout C_2S est transformé en C_3S et il existe de chaux libre

$C_3S = 4.071\,CaO - (7.600\,SiO_2 + 4.479\,Al_2O_3 + 2.859\,Fe_2O_3 + 2.852\,SO_3)$

$C_2S = 2.867\,SiO_2 - 0.7544\,C_3S$

$C_3A = 0$

$C_4AF = 2.100\,Al_2O_3 + 1.702\,Fe_2O_3$. L'équation est valable pour A/F <0.64 (Soroka, 1979)

III.7. Présences d'autres substances d'influences de qualité

Quelques éléments peuvent avoir une influence importante sur la cuisson et le processus d'hydratation du ciment. Certains de ces éléments mineurs sont présents dans la matière naturelle comme MgO, Na_2O, K_2O, SO_3, Cl, Zn. D'autres peuvent être apportés par les sous- produits de plus en plus utilisés en cimenterie soit comme matière première soit comme combustibles.

- **Alcalins (K_2O, Na_2O)**

La plupart des alcalins présents dans les matières premières sont emportés par le chauffage des gaz de combustion et le ciment ne contient qu'une petite quantité d'alcalins. S'ils sont en excès dans le ciment, ils provoquent un certain nombre de problèmes tels qu'une réaction alcali-granulat, des efflorescences et des tâches lorsqu'ils sont utilisés dans le béton, la maçonnerie ou le mortier de maçonnerie.

- **Chlore (Cl)**

Les composés du chlore sont particulièrement volatils à des températures relativement basses. C'est pourquoi il apparaît dans les gaz du cycle interne du four et il favorise le croutage, la norme impose une teneur en chlore maxi (0,05 - 0,1 %) pour éviter les agressions sur le béton.

- **Oxyde de Titane (TiO_2)**

Le TiO_2 est présent dans le ciment dans une faible mesure et est introduit dans le ciment à travers l'argile ou le schiste utilisé dans la fabrication.

- **Pentoxyde de Phosphore (P_2O_5)**

Le P_2O_5 est généralement introduit dans le ciment grâce au calcaire utilisé dans sa fabrication. Généralement la teneur en P_2O_5 du ciment ne dépasse pas 0,2 %. Sa présence ralentit le durcissement du ciment car elle décompose le C_3S en C_2S, qui contient le P_2O_5 en solution solide, et le CaO.

- **Chaux libre:** La chaux libre, parfois présente dans le ciment, peut provoquer une expansion.

CHAPITRE IV : RESULTATS D'ANALYSE ET DISCUSSION

IV.1. Composition en oxydes des ciments analysés

La composition en oxydes des différentes marques de ciment considérées, déterminées par la technique de Spectroscopie de Fluorescence à Rayons X. En outre, les compositions chimiques des marques de ciments sélectionnées et limites admissibles de l'EAS 18-1: 2001 pour le ciment portland.

Tableau 2: Composition en oxydes des différents échantillons de ciments étudiés

Échantillons / **Oxydes** en %	DANGOTE 42.5N	SIMBA 42.5N	GLC 42.5N	**EAS 18-1 :2001 en %**
CaO	**73,500**	**73,700**	65,500	**60-67**
SiO_2	**12,933**	**12,467**	**16,167**	**18-25**
Al_2O_3	3,04	3,623	5,243	**3-8**
Fe_2O_3	4,667	6,113	**7,497**	**0.5-6**
MgO	0,821	0,357	0,695	**0.1-4**
SO_3	**3,9**	2,2966	1,716	**1-3.5**
K_2O	0,696	0,175	0,961	**0.5-1**
Na_2O			0,636	0.5-1
P_2O_5	0,113	0,358	**1,520**	**0.5-1**
MnO	0,096	0,0781	1,806	
TiO_2	0,456	0,64	0,836	
SrO	0,047	0,173	0,298	
ZrO_2		0,0289	0,0112	
As_2O_3			0,011	
ZnO			0,1046	

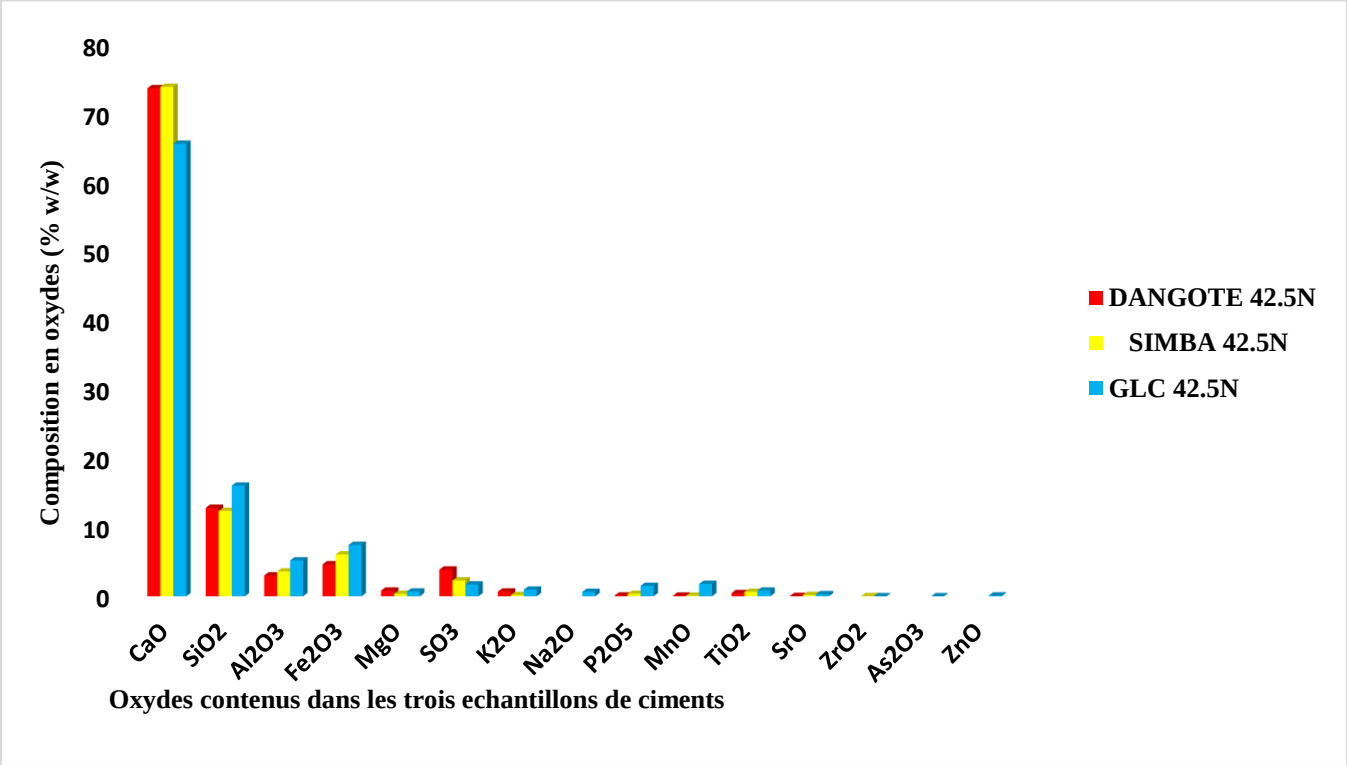


Figure 6: Composition en oxydes de différents échantillons de ciments

L'EAS spécifie le pourcentage de CaO compris entre 60-67%. Dans trois marques de ciment, le ciment GLC 42.5N contient du CaO dans la limite spécifiée qui peut être observée dans le tableau 2. De surcroit les ciments DANGOTE 42.5N et SIMBA 42.5N contiennent du CaO qui ne sont pas dans les limites recommandées. La quantité de CaO a un effet significatif sur le développement de la résistance du ciment. Par conséquent, la teneur en CaO est limitée ; lorsque la teneur en chaux est trop faible, le principal minéral générateur de résistance C_3S ne se forme pas en quantité satisfaisante, ce qui conduit à une faible résistance initiale, tandis que la teneur plus élevée en chaux provoque une résistance précoce (Al-Khateeb, 2013).

Lorsqu'elle est trop élevée, la chaux libre augmente, ce qui, lors de l'hydratation, crée une résistance précoce. Cependant, une teneur légèrement inférieure est recommandée pour la résistance ultime qui peut être obtenue progressivement sur une longue période de temps. Pour augmenter la résistance, il faut augmenter la teneur en chaux ou améliorer la finesse des grains, ou les deux (Almabrok & Khashin, 2019).

La teneur en SiO_2 du ciment GLC 42.5N se situe dans la fourchette de la norme l'EAS 18-1 :2001. La teneur en silice SiO_2 des ciments DANGOTE 42.5N et SIMBA 42.5N est en dessous de la norme recommandée (tableau 2). La silice (SiO_2) donne de la résistance au ciment en raison de la formation de silicate dicalcique et tricalcique. En outre, la silice (SiO_2) est un indicateur de finesse et détermine la capacité de broyage du clinker et confère de la résistance au ciment (Sultan et al., 2023).

Les résultats montrent que la teneur en Al_2O_3 de tous les ciments se situe dans les limites fixées par la norme EAS 18-1 :2001. Il contribue à la prise et au durcissement rapide du ciment, cependant, une haute teneur en Al_2O_3 donne un ciment très sensible à la corrosion sulfatée (Oluyemisi et al., 2014).

La teneur en Fe_2O_3 de ciment DANGOTE 42.5N se situe dans la limite spécifiée par les normes EAS 18-1 :2001, En revanche la teneur en Fe_2O_3 du ciment SIMBA 42.5N et GLC 42.5N est légèrement supérieur à la norme recommandée (Tableau 2) (Ali et al., 2008).

De plus le ciment DANGOTE 42.5N dépasse les spécifications EAS 18-1 :2001 pour le SO_3 comme le montre le tableau 2. La teneur maximale autorisée en SO_3 est limitée entre 1-3% et les ciments SIMBA 42.5N et GLC 42.5N se situent dans la plage acceptable suggérée par EAS18-1 :2001. La teneur admissible en SO_3 empêche l'expansion des sulfates et la quantité plus élevée de SO_3 peut provoquer l'expansion des sulfates. Par conséquent pour éviter l'expansion des sulfates et contrôler efficacement le temps de prise, la quantité appropriée de sulfates de calcium sous forme de gypse doit être ajoutée au clinker (Oluyemisi et al., 2014).

Les variations de MgO sont présentées dans le tableau 4. Il est à noter que les teneurs en MgO se situent bien dans la plage acceptable suggérée par EAS18-1 :2001. Si le MgO dépasse la limite spécifiée, cela signifie que du MgO libre (périclase) est disponible dans le clinker.

De petites quantités de périclase posent pas de problème, mais une grande quantité de MgO libre n'est pas souhaitable, la périclase peut s'hydrater et le MgO se convertira en MgOH, ce qui constitue une réaction expansive et peut causer des dommages (Ahmed et al., 2022).

Le K_2O et le Na_2O apparaissent en plus petites quantités (0,175%- 0,961%) et (0,636%) respectivement. La prise rapide, la réduction de la résistance et l'augmentation du retrait dans les conditions de séchage peuvent être dues à une teneur en alcalins dans le clinker.

IV.2. Composition minérale des ciments analysés

La composition minérale des différentes marques des ciments a été calculée sur base des équations de Bogue et présentée dans le tableau 5**.** La composition minérale du ciment est plus utile que sa composition en oxydes pour déterminer sa performance.

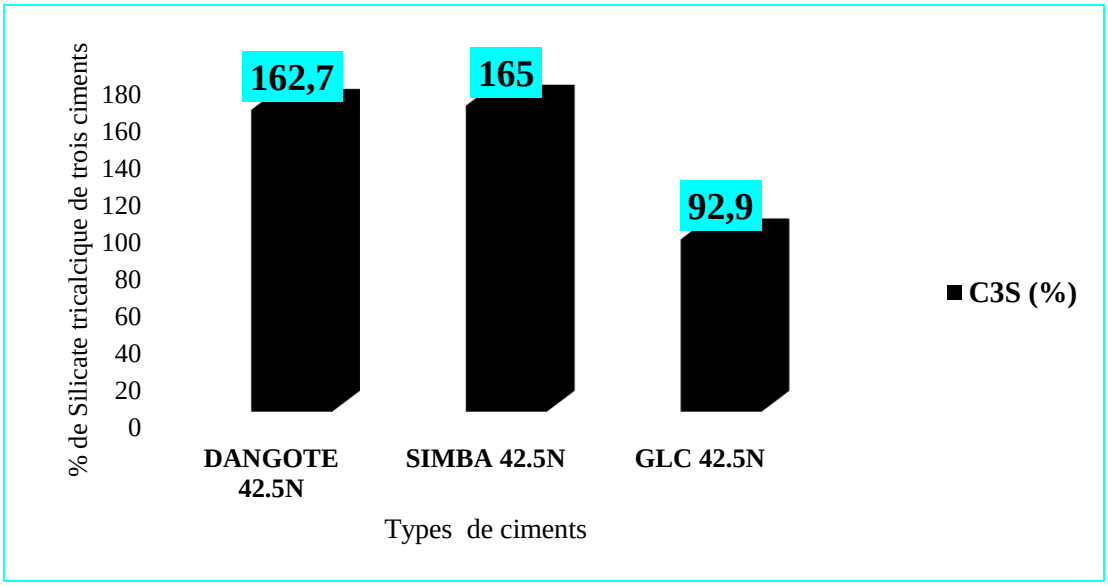


Figure 7: Pourcentage de silicate tricalcique de trois échantillons de ciment (DANGOTE 42.5N, SIMBA 42.5N et GLC 42.5N).

Les valeurs de C_3S de toutes les marques de ciments ne se situent pas dans les limites de 45 à 65% spécifiées par l'ASTM C 150. Le C_3S joue un rôle essentiel dans le processus de durcissement et de prise du ciment. Une teneur inférieure à 45% peut entraîner un durcissement plus lent et une prise retardée, tandis qu'une teneur supérieure à 65% peut accélérer le durcissement et la prise (Inam et al., 2022).

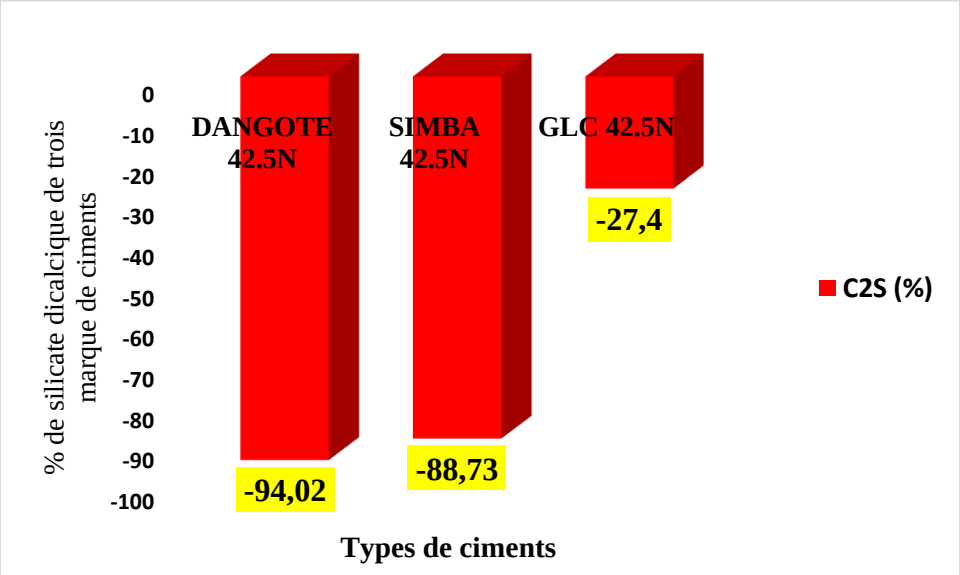


Figure 8: Pourcentage de silicate dicalcique de trois échantillons de ciment (DANGOTE 42.5N, SIMBA 42.5N et GLC 42.5N)..

Les compositions minérales des ciments variaient les unes des autres (figure 8). De manière surprenante, des valeurs négatives ont été obtenues pour les teneurs en C_2S dans tous les ciments (DANGOTE 42.5N, SIMBA 42.5N et GLC 42.5N). La raison de ces valeurs n'est peut-être pas facile à expliquer, mais l'interprétation probable de ces valeurs apparemment étranges pourrait être que la teneur en oxyde de calcium (CaO) est supérieure au minimum recommandé et la teneur en oxyde de silicium (SiO_2) est inférieure au minimum recommandé (7-32). Il possible que lors du chauffage du clinker, une partie du C_2S ait été convertie en C_3S (Olonade, 2015).

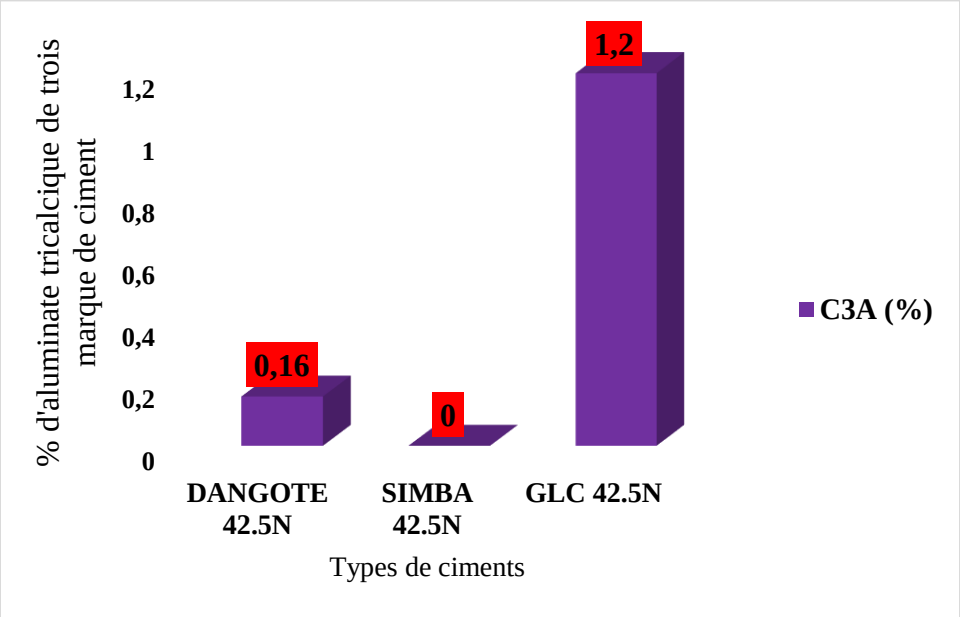


Figure 9: Pourcentage d'aluminate tricalcique de trois échantillons de ciment (DANGOTE 42.5N, SIMBA 42.5N et GLC 42.5N).

Les résultats indiquent que la valeur de C_3A pour tous les ciments concernés par cette étude, à voir DANGOTE 42.5N, SIMBA 42.5N et GLC 42.5N est inférieure à la norme (8-12). Le C_3A dans le ciment a eu différents impacts. Tout d'abord, le ciment à forte teneur en C_3A génère une chaleur d'hydratation plus élevée que le ciment à faible teneur en C_3A. Deuxièmement, la réactivité du C_3A et la solubilité du gypse jouent un rôle crucial dans le contrôle de la prise du ciment. Troisièmement, un ciment à faible teneur en C_3A est résistant aux sulfates, tandis qu'un ciment à forte teneur en C_3A est non résistant aux sulfates (Magdi Almabrok, 2019).

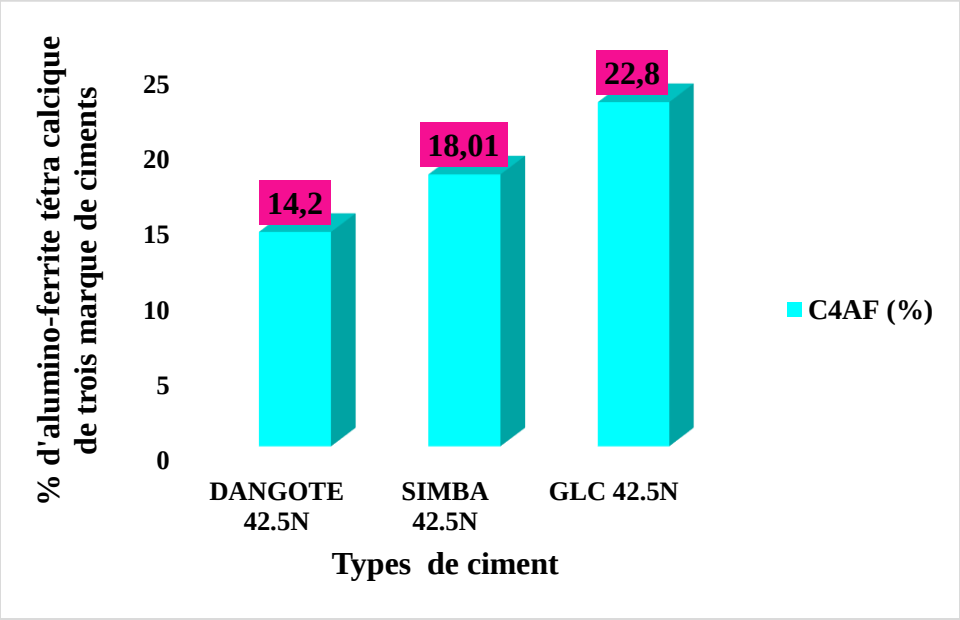


Figure 10: Pourcentage d'alumino-ferrite tetra calcique de trois échantillons de ciment (DANGOTE 42.5N, SIMBA 42.5N et GLC 42.5N).

La teneur en C_4AF de tous les ciments est supérieure aux limites (10-12) recommandées par l'ASTM C150. Le C_4AF ne joue pas un rôle important dans le comportement du ciment. Une teneur élevée en C_4AF peut potentiellement augmenter la résistance du ciment à court terme. Cependant, si la teneur en C_4AF dépasse considérablement les limites recommandées, cela peut également affecter négativement la résistance à long terme du ciment (Magdi Almabrok, 2019).

IV. 3. Résultats de calcul d'indice de la qualité

Les paramètres de contrôle du ciment tels que le Facteur de saturation de chaux (LSF), le module de silice (MS) et le module d'alumine (MA), qui influencent les performances du ciment et les plus souvent utilisés à des fins de contrôle (Ahmed et al., 2022).

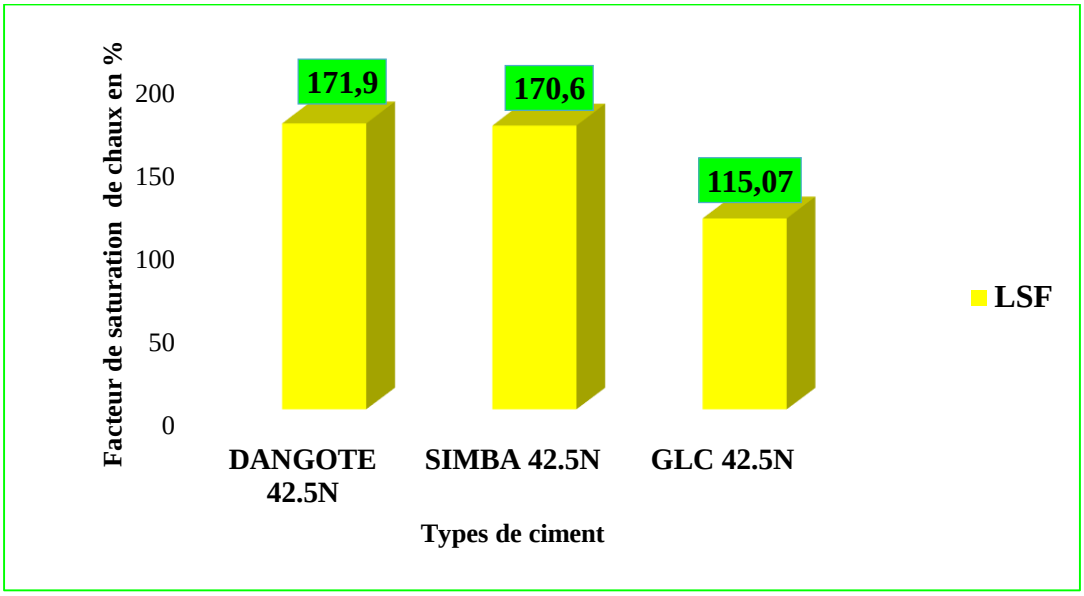


Figure 11: Valeurs de LSF pour les trois marques de ciments étudiés (DANGOTE 42.5N, SIMBA 42.5N et GLC 42.5N).

La figure 11 présente les données de LSF pour les trois marques de ciments utilisées dans cette étude. Les valeurs de LSF varient de 115,07 à 171,9% pour les différents échantillons de ciment, comme le montre la figure 11. Le LSF contrôle le rapport entre C_3S et le C_2S dans le clinker. Un clinker avec un LSF élevé a une proportion plus élevée de C_3S par rapport à C_2S qu'un clinker avec un LSF faible. Cette affirmation est évidente dans nos résultats présents dans la figure 11. Par exemple le ciment SIMBA 42.5N avait un LSF plus élevé (171,9%) que celui obtenu pour le ciment GLC 42.5N (115,07%), donc la proportion de C_3S par rapport au C_2S dans le ciment DANGOTE 42.5N était de 162,7 à -94,02% tandis que celle de ciment GLC 42.5N était de 92,9 à -27,4%.

Ces résultats ont montré de plus que tous les ciments pourraient contenir un excédent de chaux libre qui ne pourrait pas se combiner avec d'autres constituants, comme indiquent les valeurs de LSF supérieures à 100% .Si la valeur de LSF est égale à 100%, toute la chaux libre devrait s'être combinée avec C_2S pour former C_3S (Ahmed et al., 2022).

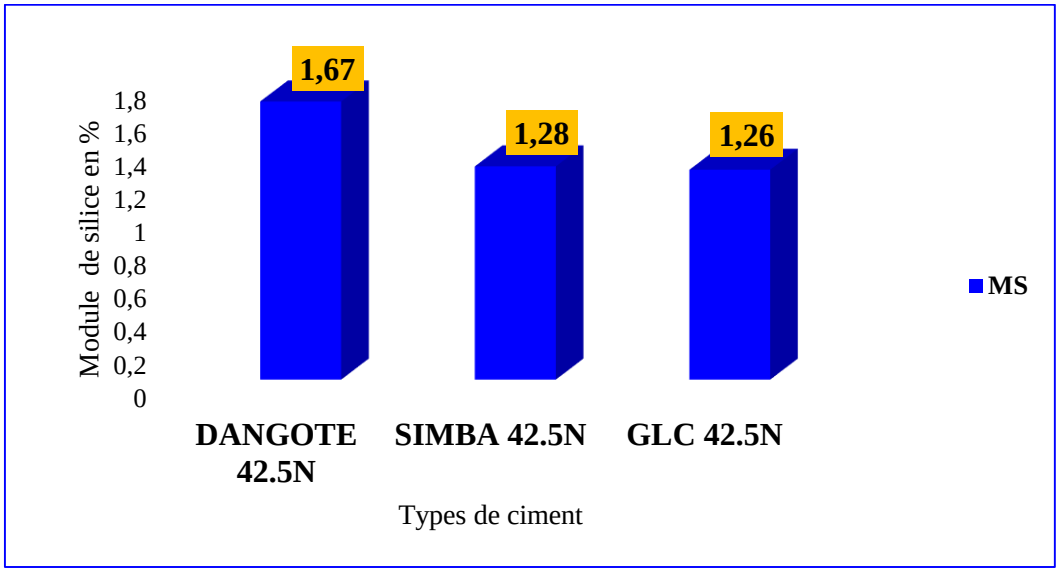


Figure 12: Valeurs de MS, de différents échantillons de ciment

Les valeurs de MS de toutes les marques de ciments ne se situent pas dans les limites typiques (2-3%) comme le montre la figure 12. Si le MS est inférieur à 2, la combustion devient très facile avec une phase liquide supplémentaire et on obtient un ciment de faible résistance. En revanche, si le MS atteint 3, la combustion devient très difficile et l'on obtient un ciment à haute résistance. En outre lorsque le MS est supérieur à 3, aucune clinkérisation n'a lieu (Almabrok & Khashin, 2019).

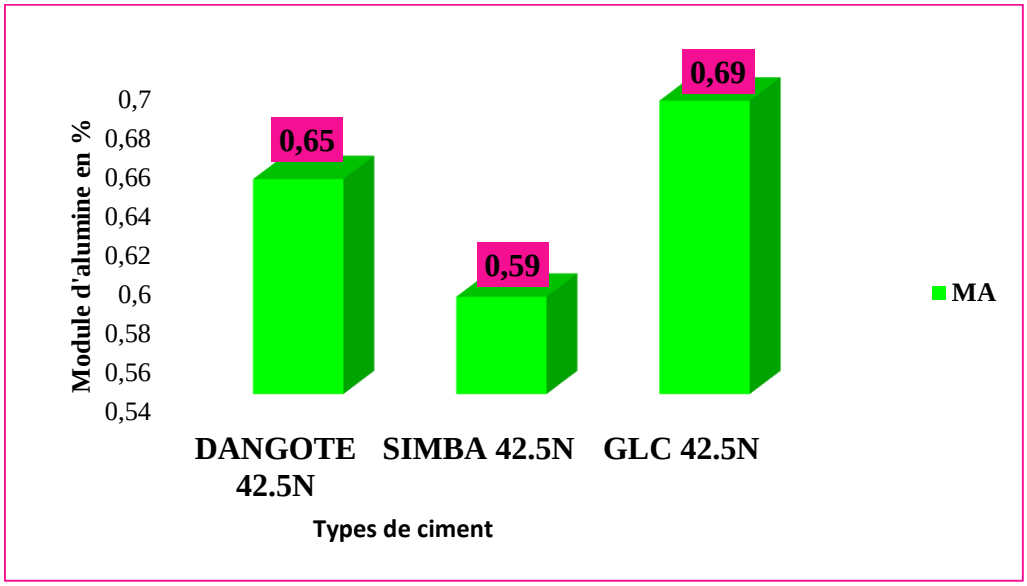


Figure 13: Valeurs de MA, de différents échantillons de ciment

Les résultats montrent que la teneur en MA de toutes les marques de ciment sont légèrement inférieures à la limite spécifiée par ASTM C150 (1-2%) comme le montre la figure 13. Un faible MA est associé à une faible chaleur d'hydratation, ce qui ralentit la prise du ciment. Inversement, un MA élevé avec un faible rapport de silicate entraine une prise plus rapide du ciment. En conséquence, l'ajout de gypse est nécessaire pour contrôler le temps de prise (Al-khateeb, 2013).

CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

L'objectif de ce travail consistait à faire l'analyse chimique de quelques échantillons de ciment couramment utilisés au Burundi. Pour ce faire la composition chimique, les paramètres de contrôle de la qualité et la composition minéralogique ont été déterminés au cours de cette étude.

Les résultats ont montré que les compositions chimiques des oxydes de calcium des ciments DANGOTE 42.5N et SIMBA 42.5N dépassent en qualité les limites établies par les normes mais pour le ciment GLC 42.5N, la teneur en oxyde de calcium est conforme à la norme exceptée des oxydes de silicium de toutes les marques de ciment reste en dehors de la norme. La teneur en oxyde d'aluminium de toutes les marques de ciment reste dans la plage spécifiée par la norme. En outre, la composition minéralogique de tous les ciments a dépassé en qualité les exigences normatives, et les paramètres tels que le facteur de saturation en chaux, le module de silice et le module d'alumine sont également hors normes. Ces caractéristiques indiquent un risque élevé de formation de chaux libre en excès, pouvant engendrer des problèmes d'expansion, de fissuration et de dégradation à long terme du béton.

Les résultats montrent que les teneurs en oxydes de magnésium et de trioxyde de soufre de toutes les marques de ciment sont conformes à la norme. Les résultats de la composition chimique de toutes les marques de ciment (DANGOTE 42.5N, SIMBA 42.5N et GLC 42.5N) ne sont pas dans les limites recommandées par la norme. Bien que les ciments puissent être utilisés dans des travaux de construction, les écarts par rapport aux exigences normatives indiquent des problèmes potentiels de qualité et de durabilité qui ne peuvent pas être ignorés. Des précautions et des ajustements supplémentaires seraient nécessaires pour garantir des performances et une durabilité satisfaisante.

Au regard de tout ce qui précède, nous formulons les recommandations suivantes :

- L’autorité de normalisation devrait élaborer une norme de qualité spécifique pour les ciments utilisés dans les constructions courantes au Burundi. Cela garantira l'utilisation de matériaux de construction sûrs et durables.
- Les ingénieurs doivent être conscients de l'impact de la qualité du ciment sur la durabilité des structures. Ils devraient être formés sur les normes de qualité du ciment.
- La population doit être informée de l'importance d'utiliser le ciment de qualité dans les constructions. Des campagnes de sensibilisation peuvent être menées pour expliquer les risques associés à l'utilisation de ciments de mauvaise qualité et promouvoir l'utilisation de ciments certifiés.
- Des études de recherche devraient être entreprises sur la résistance mécanique des types de ciment d’usage courant au Burundi parce que la composition chimique à elle seule ne suffit pas pour statuer si tel ou tel ciment est de bonne ou mauvaise qualité.

REFERENCES

Abdellah, DJERMANE, D. K. (2021). *Influence du refus et de l ’ ajout sur la résistance mécanique à jeune âge et à long terme du ciment : cas du CEMII / A-L- 42 . 5N*. 93.

Abdelwahhab, S. (2022). *Étude comparative entre un ciment à composition classique et un ciment laitier*. 89.

Adekunle, O. (2013). Comparative Analysis Of Portland Cements In Nigeria. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, *2*(3), 1–11.

Ahmed, A. O., Etonihu, A. C., & Nweze, N. O. (2022). Analysis of Chemical Compositions of Portland Cement and Limestone from Four Geopolitical Zones of Nigeria. *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*, *10*, 113–126. https://doi.org/10.4236/jmmce.2022.102009

AL-KHATEEB, R. (2013). Chemical Analysis of Ordinary Portland Cement of IRAQ. *International Journal of Chemical & Petrochemical Technology (IJCPT) ISSN(P): 2277-4807; ISSN(E): 2319-4464*, *4*(1), 22–30. https://doi.org/10.3329/cerb.v12i0.1491

Ali, M. S., Khan, I. A., & Hossain, M. I. (2008). CHEMICAL ANALYSIS OF ORDINARY PORTLAND CEMENT OF BANGLADESH. *Chemical Engineering Research*, *12*, 7–10.

Almabrok, M., & Al, E. (2019). Analysis of Chemical Composition of Different Brands of Portland cement Used in Libya. *International Journal of Civil and Structural Engineering Research*, *7*(1), 1–7.

Almabrok, M., & Khashin, N. Bin. (2019). *Analyse de la composition chimique de différentes marques de ciment Portland utilisées en Libye*. *7*(1), 1–7.

Amal, B. B. (2021). *Optimisation du pourcentage de gypse dans le ciment CPJ45*. *0*, 55.

Amin, N.-, & Ali, K. (2010). CHEMICAL ANALYSIS AND COMPARISON OF ORDINARY PORTLAND CEMENT OF KHYBER PAKHTOON KHWA

PAKISTAN. *Chemical Engineering Research*, *14*, 45–49.

BAYOULI, I. (2016). *Application de la spectrométrie de fluorescence x à L'ANALYSE in situ des métaux dans les sols contaminés*. 142.

Bouregaya, S. (2018). *Synthèse d'un ciment alitique à moindre impact environnemental à partir de vase de barrage et utilisant le sulfate de zinc comme minéralisateur*. 145. https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-02002458

Boutahar, L. (2014). Applications de la spectrométrie de fluorescence X à l ' analyse et la caractérisation des matériaux . *Mémoire En Vue de l'obtention de Diplôme de Magister En Physique.*, 123.

Dahegaokar, A. D., & Dudhe, A. D. (2023). Physical & Chemical Properties of Cement - A Study. *International Journal of Creative Research Thoughts(IJCRT)*, *11*(11), 440–445.

Dounia, S. (2022). *Elaboration d'un ciment à faible teneur en sulfure pour les bétons précontraints*. 72.

Eddine, D. O. C. (2020). *Influence des Eléments Mineurs et Majeurs Sur la Réactivité du Clinker*. 73.

Elbagermia, M. A., Alajtala, A. I., & Alkerzab, M. (2014). Chemical Analysis of Available Portland Cement in Libyan Market Using X-Ray Fluorescence. *International Journal of Chemical, Molecular, Nuclear, Materials and Metallurgical Engineering*, *8*(1), 4.

Faleye, F., Ogunnubi, S., & Olaofe, O. (2009). Chemical and Physical Analyses of Selected Cement Samples in Nigerian Market. *Bangladesh Journal of Scientific and Industrial Research*, *1*, 11. https://doi.org/10.3329/bjsir.v44i1.2712

Fatima, B., & Hakima, B. (2014). *Thème :Etude théorique de la spectroscopie de fluorescence des rayons X (XRF) pour l'étude des matériaux*. 43.

FDUS EAS 18-1. (2018). *Cement — Part 1: Composition, specification and conformity criteria for common cements*. *First Edition*, 35,p.

Frideric, J. (2014). *Contribution à l'étude de la valorisation des poudres de granite, déchets d'une carrière de la societé proganit en cimenterie*. 120.

H. Debouba*, R. Laabidi, R. R. (2019). Valorisation des déchets de construction dans la fabrication du ciment. *Algerian Journal of Environmental Science and Technology*, *5*(4), 6. https://doi.org/10.1016/j.calphad.2017.12.003

Harrisson, A. M. (2019). Constitution and specification of Portland cement. In *Lea's Chemistry of Cement and Concrete* (5th ed.). Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100773-0.00004-6

Imane, A. (2020). Impact des Alcalis sur les Performances de Ciment. *Université Mohamed Khider de Biskra*, 99.

Inam, I., Khalid Nasiry, M., & Wahdat, M. N. (2022). Comparative Analysis of the Chemical Compositions of Afghani Ghori and Various Pakistani Cement Brands Used in Afghanistan. *KPU International Journal of Engineering & Technology*, *2*(1), 0–12.

Kurdowski, W. (2014). *Cement and Concrete Chemistry*.

Lanto, :RASOLONJATOVO. (2013). *Analyse comparative des differents types de ciments vendus à Madagascar*. 120.

Loubna, S. (2022). *Elaboration d'un ciment pétrolier de classse G*. 67.

Magdi Almabrok, N. B. K. (2019). Analysis of Chemical Composition of Different Brands of Portland cement Used in Libya. *International Journal of Civil and Structural Engineering Research*, *7*(1), 1–7.

Mizab, M. (2020). Analyse et caractérisation des constituants du ciment cas de la cimenterie d'Elma Labiod. *Université Larbi Tebessi – Tébessa*, 112.

Newman, John, B. S. C. (2003). *Advanced Concrete Technology Constituent Materials*. 280.

Olonade, K. A. (2015). COMPARATIVE QUALITY EVALUATION OF CEMENT BRANDS USED IN SOUTH WEST NIGERIA. *Academy Journal of Science and Engineering*, *9*(1), 12.

Oluyemisi, A., Samuel, A., & Goke, B. (2014). Comparative Analysis of the Chemical Composition of Various Brands of Portland Cement Available in South- Western Parts of Nigeria. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT) ISSN: 2278-0181*, *3*(8), 7. https://doi.org/10.13140/RG.2.2.12142.23362

Rufin, R. (2016). *Investigation des éléments minéraux en trace et actifs dans le khat par la technique de fluorescence x à énergie dispersive (EDXRF)*. *Thèse de doctorat*, 115.

Salah, B. M. (2019). Caractérisation physico-chimique et microstructurale des ajouts minéraux. *Thèse Doctorat. Université Batna 2 – Mostefa Ben Boulaïd*, 244.

Samia, M. R. (2010). *Impact De La Pollution De l'air Provoqueepar La Cimenterie Tahardjouad Sur La Sante Publique Et Le Cadre Bati-Cas De Hamma Bouziane*. 181.

Sanusi Nuhu1, 2, Ladan3, S., & Abubakar Umar Muhammad4. (2020). Effects and Control of Chemical Composition of Clinker for Cement Production. *International Journal of Control Science and Engineering 2020, 10(1): 16-21 DOI: 10.5923/j.Control.20201001.03*, 7. https://doi.org/10.5923/j.control.20201001.03

Soroka, I. (1979). Portland Cement Paste and Concrete. In *International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete* (Vol. 1, Issue 2). https://doi.org/10.1016/0262-5075(79)90018-6

Stutzman, P., Heckert, A., Tebbe, A., & Leigh, S. (2014). Cement and Concrete Research

Uncertainty in Bogue-calculated phase composition of hydraulic cements. *Cement and Concrete Research*, *61–62*, 40–48. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2014.03.007

Sultan, M. A., Jawad, M., Din, S. U., Cheema, S. M., & Mushtaq, A. (2023). Analysis of the Chemical Compositions of Locally Branded Manufactured Cement of Pakistan. *Ecological Engineering & Environmental Technology Https://Doi.Org/10.12912/27197050/159729*, *24*(3), 147–152.

Taylor, H. F. W. (1997). Cement chemistry. 2nd ed. *Academic Press*, *20*(4), 335.

Thirion-merle, V., & Lyon, U. De. (2015). Spectrométrie de fluorescence X. *Archéométrie et Archéologie, UMR5138, Maison de l'Orient et de La Méditerranée CNRS, Université de Lyon, 7, Rue Raulin Lyon, France*, 1–7.

Yalamarty, P. S. (2018). Études sur l ' évaluation des paramètres du ciment de différentes marques de ciment. *Journal International Du Génie Civil et de La Technologie (IJCIET)*, *9*(6), 12.

Sites web visités :

IWACU, 2020. *https*://www.iwacu-burundi.org/le-bbn-interdit-la-commercialisation-du-ciment-de-la-societe-chinoise-glc-produit-en-rdc/

ABP, 2020. https://english.abpinfo.bi/2023/09/20/cement-manufactured-by-great-lakes-company-glc-does-not-meet-standards-according-to-bbn/