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

Détermination de la composition chimique de quelques types de ciment d'usage courant au Burundi

Nihorimbere, Samuel; Sous la Direction de : Prof. Steve De Cliff

2024-04
UB, FS
https://repository.ub.edu.bi/handle/123456789/2008

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

UNIVERSITE DU BURUNDI

FACULTE DES SCIENCES

Département de chimie

Détermination de la composition chimique de quelques types de ciment d'usage courant au Burundi

Par

Samuel NIHORIMBERE

Mémoire présenté et défendu en vue d'obtention du diplôme de Master en Sciences Chimiques

Spécialité: Contrôle et Analyses Chimiques

Sous la Direction de **: Prof. Steve De Cliff**

Bujumbura, Avril, 2024

MEMBRES DU JURY

Président : Prof. Samuel BUNANI

Secrétaire : Dr Léopold HAVYARIMANA PhD

Directeur : Prof. Steve De Cliff

Membre: Prof. Godefroid GAHUNGU

DEDICACE

Avec la grâce de Dieu tout puissant, qui m'a tracé le chemin durant mon cursus académique, j'ai pu réaliser ce travail de mémoire que je dédie :

A mes chers parents;

A mes chers frères et sœurs;

A mes chers oncles et tante;

A mes chers cousins et cousines;

A toi ma chère fiancée : Yvette NAHIMANA;

A tous mes amis(es) et camarades de promotion;

A tous ceux qui me sont chers et connaissances;

Je dédie ce mémoire.

REMERCIEMENTS

Au terme de ce travail, je suis content d'exprimer mes vifs remerciements à toute personne qui a contribué à sa réalisation. Ce travail de mémoire est réalisé au département de chimie, Faculté des Sciences, Université du Burundi en collaboration avec le laboratoire de l'OBM.

Mes sincères remerciements vont premièrement à l'endroit de mon Directeur de mémoire **Professeur Steve De Cliff**, qui malgré ses nombreuses préoccupations, a accepté d'encadrer et de diriger ce mémoire. J'adresse également mes remerciements au **Professeur Samuel BUNANI**, pour m'avoir fait l'honneur de présider le jury de mon mémoire durant la défense de ce travail.

Mes sincères remerciements sont adressés aussi au **Docteur Léopold HAVYARIMANA**, secrétaire du jury de mon travail, qui m'a prodigué des conseils dès le début de mon travail jusqu'à ce jour. J'exprime également mes vifs remerciements au **Professeur Godefroid GAHUNGU**, membre du jury de mon mémoire, qui a accepté d'examiner et d'apporter des jugements à mon travail. Mon sincère remerciement s'adresse également à **Madame Clairia KANKURIZE**, Directeur Général de l'OBM et **Madame Béatrice NKURUNZIZA**, Directrice de laboratoire à l'OBM qui ont accepté de m'accueillir et m'ont permis d'effectuer les analyses dans leur laboratoire.

Mes reconnaissances s'adressent également à messieurs **SIMBAVIMBERE Jean Paul** chef du service physico-chimique et **Abel Désiré NSHIMIRIMANA**, chef du service de préparation des échantillons et maintenance des équipements, pour leurs contributions à l'aboutissement de ce travail de mémoire. Je ne peux pas oublier tous nos enseignants de l'Université du Burundi spécialement ceux de la Faculté des Sciences dans le département de chimie pour la formation tant morale qu'intellectuelle qu'ils m'ont données.

De plus, je remercie ma famille en particulier mes chers parents qui m'ont apporté leur soutien tant moral que matériel au cours de ma formation scolaire et tout au long de la préparation de ce travail. Enfin, je dis merci à tous mes camarades de classe et à toutes les personnes qui ne trouvent pas leurs noms cités et qui m'ont prêté une main-forte pour que le présent travail connaisse l'issue actuelle.

RESUME

La composition chimique du ciment a un impact très remarquable sur les performances du béton obtenu ou du mortier. Différents types de ciment sont utilisés au Burundi par des entrepreneurs locaux pour divers travaux de construction sans connaissance préalable de leurs performances. Dans cette étude, trois différents types de ciment qui sont couramment utilisés au Burundi ont été analysés par un spectromètre de fluorescence a rayons X (XRF) pour déceler sa composition chimique par rapport à la spécification de la norme EAS 18 : 2001. Les résultats de l'analyse ont montré qu'il y avait une différence entre les valeurs de la composition chimique en CaO par rapport à celle spécifiées par la norme EAS 18 :2001 pour les deux ciments DANGOTE 42.5R (72.6%) et BUCECO 32.5R(47.733) qui sont couramment commercialisés et utilisés au Burundi. Pour le cas du ciment 154850, leur composition chimique se trouve dans les limites exigées par la norme EAS 18 :2001. Après avoir trouvé les résultats d'analyse chimique, permettant de déterminer les compositions minérales de chacun de trois types de ciment étudiés. La formule de Bogue a été utilisée au cours de la détermination minéralogique. Par rapport à la spécification de la norme ASTMC150, les quatre phases principales du ciment à savoir : C_3S, C_2S, C_3A et C_4AF pour le ciment DANGOTE 42.5R et BUCECO 32.5R, ne se présentent pas tous dans ces ciments. Néanmoins, en matière de composition minérale, toutes les quatre phases principales se présentent pour le ciment GLC 42.5N.

Mots clés : **Ciment, composition chimique, composition minérale.**

SUMMARY

The chemical composition of cement has a very remarkable impact on the performance of the concrete obtained or the mortar. Different types of cement are used in Burundi by local contractors for various construction works without prior knowledge of their performance. In this study, three different types of cement that are commonly used in Burundi were analyzed by an X-ray fluorescence (XRF) spectrometer to detect its chemical composition in relation to the specification of the EAS 18:2001 standard. the analysis showed that there was a difference between the values of the chemical composition in CaO compared to that specified by the EAS 18:2001 standard for the two cements DANGOTE 42.5R (72.6%) and BUCECO 32.5R (47.733) which are commonly marketed and used in Burundi. For cement 154850, their chemical composition is within the limits required by the EAS 18:2001 standard. After having found the results of chemical analysis, making it possible to determine the mineral compositions of each of the three types of cement studied. The Bogue's formula was used during the mineralogical determination. Compared to the specification of the ASTMC150 standard, the four main phases of cement, namely: C3S, C2S, C3A and C4AF for DANGOTE 42.5R and BUCECO 32.5R cement, are not all present in these cements. However, in terms of mineral composition, all four main phases are present for GLC 42.5N cement.

Key words: Cement, chemical composition, mineral composition.

TABLE DES MATIERES

MEMBRES DU JURY ..... **i**

DEDICACE ..... **ii**

REMERCIEMENTS ..... **iii**

RESUME ..... **iv**

SUMMARY ..... **v**

TABLE DES MATIERES ..... **vi**

LISTE DES TABLEAUX ..... **viii**

LISTE DES FIGURES ..... **viii**

LISTE DES ABREVIATIONS ..... **ix**

AVANT- PROPOS ..... **x**

CHAPITRE I : INTRODUCTION GENERALE **1**

I.1. Problématique sur la qualité du ciment 2

I.2. Objectif et intérêt du sujet 3

CHAPITRE II : REVUE DE LA LITTERATURE SUR LE CIMENT **4**

II.1. Historique sur le ciment 4

II.2. Définition 5

II.3. Composition chimique du ciment portland 6

II .4. Normalisation et classification des ciments 6

II.4.1. Normalisation 6

II.4.2. Principales catégories de ciment 7

II .4.3. Classification des ciments en fonction de leur résistance normale 9

II.5. Différents procédés de fabrication des types de ciment 11

II.5.1. Principales phases du ciment portland 11

II .5.2. Procédés de fabrication du ciment 11

II.5.3. Principe de fabrication du ciment Portland 14

II.5.4. Matières premières 15

II.6. Etapes de la fabrication du ciment Portland 16

II.6.1. Carrier 16

II.6.2. Concassage 16

II.6. 3. Stockage de matière première 16

II.6 .4. Pré-homogénéisation 16
II .6.5. Broyage et séchage 17
II .6.6. Homogénéisation 17
II.6.7. Zone de cuisson 18
II.6.8. Refroidissement 20
II.6.9. Stockage du clinker et broyage du ciment 21
II.7. Principales caractéristiques de ciment 21
II.7.1. Caractéristiques chimiques 21
II 7. 2. Caractéristiques physiques 23
II.7.3. Caractéristiques mécaniques 24
CHAPITRE III : MATERIELS ET METHODE D'ANALYSE 25
III. 1. Matériels et échantillonnage 25
III.1.1. Description des échantillons 25
III.1.2. Equipements d'analyse 26
III.1.3. Préparation des pastilles d'échantillons 26
III.2. Méthodes d'analyses chimiques 27
III.2.1. Détermination de la composition chimique par XRF 27
III.2.2. Calcul des paramètres d'indice de la qualité et la détermination de la composition minérale par calcul de Bogue 29
III.2.3. Détermination de la composition minérale : formule de BOGUE 31
III.2.4. Présences d'autres substances influençant la qualité du ciment 33
CHAPITRE IV : RESULTATS D'ANALYSE ET DISCUSSION 35
IV.1. Composition chimique des ciments analysés 35
IV.2. Paramètres d'indice de la qualité 38
IV.3. Composition minérale des ciments analysés 40
CHAPITRE V : CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS 46
V. 1. CONCLUSION 46
V.2. RECOMMANDATIONS 47
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES 48

LISTE DES TABLEAUX

Table 1: Différents types de ciments et leurs compositions. 9
Table 2: Classe de résistance du ciment 10
Table 3: Composition minéralogique du clinker 20
Table 4: Compositions chimiques en pourcentage massique des différents types des ciments analysés par XRF 35
Table 5: Paramètres d'indice de la qualité 38
Table 6: Composition minérale des ciments analysés 40

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Description des étapes de fabrication du ciment par voie sèche 13
Figure 2: Fabrication du ciment, schéma de principe 14
Figure 3: Aspect du clinker après refroidissement 20
Figure 4: Poudres du ciment 21
Figure 5: Presse hydraulique de marque MP250 27
Figure 6: Spectromètre XRF séquentielle de paillasse de marque RIGAKU Supermini200 29
Figure 7: Résultats des analyses chimiques 36
Figure 8: Représentation graphique de la MC. 38
Figure 9: Représentation graphique de la MA. 39
Figure 10: Représentation graphique de la MS. 40
Figure 11: Présentation graphique de la composition en C_3S. 41
Figure 12: Présentation graphique de la composition en C_2S. 42
Figure 13: Présentation graphique de la composition en C_3A. 42
Figure 14: Présentation graphique de la composition en C_4AF 43
Figure 15: Présentation graphique de la composition en C_5A_3 44
Figure 16: Présentation graphique de la composition en CaO_L 44

LISTE DES ABREVIATIONS

ASTM **:** American Society for Testing and Materials

BBN : Bureau Burundais de Normalisation et contrôle de la qualité

C_2S : Silicate dicalcique

C_3A : Aluminate tricalcique

C_3S : Silicate tricalcique

C_4AF **:** Aluminoferrite tétracalcique

C-A-H : Aluminates de calcium hydratés.

CaO_L : Chaux libre

CEM : Ciment

C-S-H : Silicates de calcium hydratés.

EAS : East African Standard

I : Indice d'hydraulicité

MA : Module d'alumine

MC : Module de chaux

MS : Module de silice

OBM : Office Burundais des Mines et Carrières

XRF : Spectrométrie de fluorescence à rayon X

AVANT- PROPOS

Le ciment est le principal liant utilisé pour fabriquer le béton, qui est un matériau de construction fondamental pour la construction de bâtiments, de routes, de ponts et d'autres infrastructures. Il est obtenu par la cuisson et le broyage de matériaux calcaires et argileux. Cependant, la qualité de ciment peut varier considérablement d'un fabricant à l'autre.

Dans cette étude, nous nous concentrerons sur certains paramètres de qualité des ciments vendus dans la Mairie de Bujumbura, en utilisant une approche approfondie pour s'assurer si les ciments vendus sur le marché Burundais sont conformes aux exigences des normes afin de garantir la solidité et la durabilité des infrastructures.

Ce travail est réalisé dans le cadre d'un mémoire de fin d'étude en vue d'obtenir le diplôme de Master en sciences chimique, spécialité: Contrôle et Analyses Chimiques. Il a pour objectif : « déterminer la composition chimique des ciments : DANGOTE 42.5R, BUCECO 32.5R et GLC 42.5N d'usage courant au Burundi».

Les résultats permettront d'avoir un meilleur aperçu sur la qualité des ciments couramment utilisés par la population Burundaise et identifieront les éventuels points d'amélioration. Cela contribuera à promouvoir l'utilisation des ciments de bonnes qualités pour garantir la solidité et la durabilité des infrastructures.

CHAPITRE I : INTRODUCTION GENERALE

Le ciment est un matériau de construction essentiel qui a une longue histoire remontant à l'Antiquité (Thomas & Kankam, 2022) (Chaht fouzia, 2012) (Mounsif, 2018). Il a été utilisé depuis la plus haute antiquité et principalement à l'époque romaine durant laquelle de véritables bétons à base de liant naturel (pouzzolane en mélange avec de la chaux) a été mis en œuvre et existe encore de nos jours.

L'utilisation de liants remonte à l'antiquité. Les égyptiens avaient découvert un liant calcique, obtenu par cuisson de roches calcaires. La chaux vive produite était préalablement éteinte par de l'eau (Prince U & Munachiso C, 2022). Son durcissement s'effectuait par carbonatations à l'air. Plus tard les romains furent probablement les premiers à fabriquer des liants hydrauliques en mélangeant de la chaux et des cendres volcaniques (pouzzolane) de la région de Pozzuoli au pied du Vésuve donnant naissance au ciment « Pouzzolanique » ; un matériau capable de fixer la chaux en présence d'eau. Cependant, ce n'est qu'au XVIIIème siècle que fut inventé le ciment artificiel (Lwiza, 2016) (Govin, 2006).

Jusqu'à la fin du 18^{è} siècle, la cuisson plus ou moins poussée de chaux avec des quantités variables d'argiles, donne lieu à des chaux plus ou moins hydrauliques, mais ce liant ne servit qu'à la confection de mortiers de maçonnerie (Ir C. Ployaert, 2013).

Le ciment, matériau à la fois ancien est très largement utilisé, à l'image d'un produit banal et simple. Pourtant, derrière cette apparente banalité, se trouve un matériau très complexe, imparfaitement connu aussi bien du point de vue des réactions physico-chimiques, hautes températures qui se produisent lors de la fusion des matières premières au niveau du four, que lors des réactions d'hydratation pendant la prise ou plus tard lorsque le matériau acquiert des propriétés de résistances mécaniques énormes (Achraf & Med nadire, 2018).

La composition chimique est un facteur déterminant pour la résistance des ciments aux agents agressifs. Le laboratoire de contrôle dans l'industrie du ciment possède un rôle important et indispensable. C'est à des contrôles effectués à chaque étape du processus de fabrication dont dépend la qualité recherchée du ciment.

En effet, le prélèvement continu des échantillons permet aux chimistes de contrôler régulièrement le respect des valeurs limites dans les matières premières et les combustibles. Les essais sont donc réalisés tant sur les produits semi-finis ou finis (analyse chimique et minéralogique), que sur les mortiers pour en vérifier les caractéristiques (prise, résistance mécanique) (Sana, 2020). Le ciment est aujourd'hui un produit industriel décliné sous des formes variées (ciment Portland, ciment alumineux, béton hautes performances,…) pour des multiples utilisations (ouvrages d'art, bâtiment, infrastructures, embellissement de façades, …) (Gmira, 2003).

Le ciment Portland est un produit complexe fabriqué à partir de matériaux très simples et abondants : calcaire et argile (ou schiste) (Ali et al., 2008a). Des proportions très précises de ces deux matériaux de base doivent être mélangées avec quelques ajouts pour créer un repas cru avec une composition chimique précise; cela aboutira à la production de clinker grâce au pyrotraitement complexe (Aïtcin, 2016).

I.1. Problématique sur la qualité du ciment

Le ciment est un produit complexe obtenu à partir de matériaux naturels courants non transformés : calcaire et argile. Par conséquent, les caractéristiques du clinker de ciment Portland peut varier d'une cimenterie à l'autre. La limite des variations des technologies, propriétés du ciment Portland, des normes d'acceptation ont été élaborées, mais actuellement ces normes ne sont pas satisfaisantes pour l'ensemble du marché du béton (Aïtcin, 2016).

Le contrôle de la qualité vise à faire respecter les principes de la qualité et des normes en vigueur au Burundi. Signerons que, au Burundi 600 tonnes de ciment de la société chinoise Great Lakes Company (GLC) basée en RDC déchargées au port de Bujumbura le 25 septembre 2023 sont immobilisées dans les entrepôts du port. Cela a été dû au changement et à la falsification des documents certifiant la qualité dudit ciment par le fabriquant. Ce qui a suscité le doute du BBN.

Ainsi, suite au doute de ce Bureau par rapport à la qualité du ciment, la décision a été d'abord d'interdire l'introduction du produit sur le marché pour analyser si la qualité de ce ciment est conforme aux normes. Soulignons cependant que la mauvaise qualité du ciment entraine des divers problèmes, ce qui peut avoir des conséquences néfastes sur les bâtiments (effondrement des maisons par exemple) et les infrastructures.

Il est donc crucial de s'assurer de la qualité des ciments commercialisés au Burundi pour garantir la solidité et la durabilité des infrastructures (Sana, 2020).

I.2. Objectif et intérêt du sujet

Avec l'économie du marché, l'importation des produits industriels est libéralisée au Burundi. Il y a l'importation des différents types des ciments de plusieurs origines.

Le présent travail a pour objectif global de faire la détermination de la composition chimique de ciments : DANGOTE 42.5R, BUCECO 32.5R et GLC 42.5N d'usage courant au Burundi pour s'assurer si les ciments vendus sur le marché Burundais sont conformes aux exigences des normes afin de garantir la solidité et la durabilité des infrastructures.

Pour atteindre cet objectif, des objectifs spécifiques ont été formulés :

- Analyser la composition chimique par spectromètre de fluorescence à rayon X qui permet de déterminer qualitativement et quantitativement la composition chimique de chaque type de ciment ;
- Déterminer la composition minérale des quatre phases principales du ciment par calcul de Bogue;
- Calculer les paramètres d'indice de la qualité ;

Le ciment de bonne qualité contribue à la stabilité et à la résistance globale des infrastructures ce qui est indispensable dans l'économie du pays :

- Dans la politique Nationale de l'habitat (effondrement de bâtiment)
- Dans la politique Nationale des infrastructures routières : pont ; autoroute ;…
- Dans la politique Nationale des grands ouvrages : Barrages ; grand stade de sport …

Après les méthodes de vérification de la conformité du ciment, l'hypothèse de la recherche est la suivante :

La composition chimique de tous les types de ciments (DANGOTE 42.5R, BUCECO 32.5R, GLC 42.5N) commercialisés et utilisés au Burundi est conforme aux normes de la réglementation.

La composition minérale de ces ciments est conforme à l'exigence des normes.

CHAPITRE II : REVUE DE LA LITTERATURE SUR LE CIMENT

II.1. Historique sur le ciment

Auparavant, le ciment aurait été inventé par les Égyptiens, puis fut amélioré par les civilisations suivantes par l'ajout de chaux à l'argile. La chaux, connue depuis l'antiquité: ne durcit pas sous l'eau. Les Grecs d'Italie le renforcèrent avec des cendres pouzzolaniques (cendres volcaniques de la région de Pouzzoles), et cet usage fut repris et généralisé par les Romains (Sawadogo, 2021). Jusqu'à l'époque moderne, le ciment est un liant, souvent une chaux additionnée à des adjuvants tels des tuiles ou briques concassées, où l'argile possède des propriétés hydrauliques. La pouzzolane est très utilisée comme adjuvant. Le ciment ne prit son acception contemporaine qu'au XIX^{è} siècle, lorsque Louis Vicat identifia le phénomène d'hydraulicité des chaux en 1817, et celle des ciments, qu'il dénomma « chaux éminemment » hydrauliques, ou chaux limites, en 1840 (Charles Stéphan, 2018).

L'Ecossais Aspdin prit un brevet d'invention en 1824, sur la fabrication d'un liant à partir d'un mélange de chaux et d'argile(Ayotunde Akanni et al., 2020) qu'il appela "ciment Portland" à cause de l'aspect présenté par ce liant durci qui rappelait celui de la pierre calcaire de la Presqu'île de Portland. C'est le premier ciment, père d'une longue lignée (Fouad, 2006).
Le ciment Portland revêt depuis de nombreuses années une immense importance dans le génie civil et les travaux de construction, et sa fabrication a donné naissance à une grande industrie (Skempton, 2016).

C'est seulement en 1845 que Johnson indiquèrent de façon précise les règles de fabrication de ce produit. À la fin du XIXème 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 XXème siècle. En 1890, on comprit l'intérêt du laitier granulé ajouté au ciment, et après 1945, celui des cendres volantes.

La première usine de ciment a été créée par Dupont et Demarle en 1846 à Boulogne-sur-Mer. Le développement n'a pu se faire que grâce à l'apparition de matériels nouveaux, comme le four rotatif et le broyeur à boulets.

Les procédés de fabrication se perfectionnèrent sans cesse, et le temps nécessaire pour produire une tonne de clinker est passé de quarante heures en 1870, à environ trois minutes actuellement (Amel, 2016).

II.2. Définition

Le ciment est un liant hydraulique, c'est à dire un matériau minéral finement moulu qui, gâché avec l'eau, forme une pâte qui fait prise et durcit par suite de réaction et de processus d'hydratation et qui, après durcissement, conserve sa résistance et sa stabilité même sous l'eau (Oueslati & Tiss, 2011).

Il est obtenu par broyage fin du clinker avec une quantité nécessaire de gypse ($CaSO_4 .2H_2O$) et un / ou des ajout(s) minéraux actifs (ciment composé) (Elbeyli et al., 2003), faite simultanément ou par malaxage minutieux des mêmes matériaux finement broyés séparément. De plus le ciment est une poudre minérale fine obtenue au terme d'un processus de fabrication très précis. Selon la composition et la finesse de la poudre, les propriétés du ciment ne sont pas les mêmes (Sana, 2020).

Le ciment est un produit moulu du refroidissement du clinker qui contient un mélange de silicates et d'aluminates de calcium porté à 1450 – 1550 °C. Il est défini selon la norme NFP15301, comme une fine mouture inorganique, qui gâchée avec l'eau, forme une pâte qui fait prise et durcit(Elbeyli et al., 2003).

Le ciment selon la norme NBN EN 197-1, appelé ciment CEM, mélangé avec des granulats et gâché avec de l'eau de façon appropriée, doit être capable de produire un mortier ou un béton qui conserve son ouvrabilité pendant un temps suffisamment long et doit, après des périodes déterminées, atteindre des niveaux de résistance prescrits et aussi présenter une stabilité à long terme (Ir C. Ployaert, 2013).

II.3. Composition chimique du ciment portland

Les principaux oxydes qu'on trouve dans le ciment Portland sont : CaO, SiO_2, Al_2O_3,Fe_2O_3,Na_2O,K_2O,SO_3,MgO (Nicolas, 2009).

Les quatre premiers oxydes de la liste dont l'oxyde de calcium (CaO), l'oxyde de silice(SiO_2) , l'oxyde d'allinium(Al_2O_3) et l'oxyde de fer(Fe_2O_3) sont les plus importants et représentent environ 90 % de la masse du ciment Portland (Okumu et al., 2017) et sont combinés pour former quatre phases minérales (Nicolas, 2009).

II .4. Normalisation et classification des ciments

II.4.1. Normalisation

L'objectif principal de la normalisation du ciment est d'établir des normes et des spécifications techniques qui garantissent la qualité, la sécurité et la performance du ciment utilisé dans la construction. La normalisation du ciment comme autant d'autres produits commercialisables est réalisée par des organismes nationaux de normalisation, tels que l'Association française de normalisation (AFNOR) (Thibaudon et al., 2019) en France ou l'International Organization for Standardization (ISO) au niveau international.

Les normes de ciment définissent les caractéristiques physiques, chimiques et mécaniques du matériau, ainsi que les méthodes d'essai appropriées. Elles couvrent des aspects tels que la composition chimique du ciment, les propriétés physiques (comme la résistance à la compression, la finesse, la densité, etc.), la réactivité avec l'eau, la durabilité, la compatibilité avec d'autres matériaux de construction, etc (Frideric, 2014).

La normalisation du ciment est essentielle pour assurer la qualité et la fiabilité des matériaux de construction utilisés dans les projets de construction. Elle permet aussi de garantir que le ciment répond aux exigences minimales de performance et de sécurité, ce qui contribue à la durabilité des structures et à la sécurité des utilisateurs.

De plus, la normalisation facilite la comparaison des ciments produits par différents fabricants et permet aux utilisateurs de choisir le ciment le plus approprié pour leurs besoins spécifiques. Les normes de ciment servent également de référence pour l'élaboration de réglementations et de codes de construction.

Les pays membres de l'Union Européenne (UE), par exemple, emploient la même norme (EN 197-1) dans le domaine des ciments (Charles Stéphan, 2018).

II.4.2. Principales catégories de ciment

Les ciments peuvent être classés dans les différentes catégories en fonction de leur composition minérale et de leur résistance normale.

a. Classification des ciments en fonction de leur composition

Les ciments constitués de clinker (constituants principaux) et des constituants secondaires sont classés en fonction de leur composition, en cinq types principaux par la norme NF P15-301.
Ils sont numérotés de 1 à 5 en chiffres romains dans leur notation européenne (la notation française est indiquée entre parenthèse) (Amel, 2016):

- CEM I: Ciment Portland (CPA),
- CEM II: Ciment portland composé (CPJ),
- CEM III: Ciment de haut fourneau (CHF),
- CEM IV: Ciment pouzzolanique (CPZ),
- CEM V: Ciment au laitier et aux cendres (CLC)

b. Constituants des ciments courants

Les constituants du ciment présentent une ou plusieurs des propriétés suivantes:

- des propriétés hydrauliques, c'est-à-dire qu'ils forment par réaction avec l'eau des composés hydratés stables très peu solubles dans l'eau;
- des propriétés pouzzolaniques, c'est-à-dire qu'ils ont la faculté de former à température ordinaire, en présence d'eau, par combinaison avec la chaux, des composés hydratés, stables;
- des propriétés physiques qui améliorent certaines qualités du ciment (accroissement de la maniabilité et de la compacité, diminution du ressuage, etc.) (FDUS EAS 18-1, 2018).

On distingue les constituants principaux (matériau minéral représentant une proportion supérieure à 5 % en masse de la somme de tous les constituants principaux et secondaires) à savoir : Clinker Portland (K), Laitier granulé de haut-fourneau (S) , Pouzzolanes naturelles (P) ou naturelles calcinées (Q), Cendres volantes siliceuses (V) ou calciques (W),Schistes calcinés (T), Calcaires (L, LL), Fumées de silice (D) (Chaht fouzia, 2012) et

les constituants secondaires (matériau minéral représentant une proportion inférieure ou égale à 5 % en masse de la somme de tous les constituants principaux et secondaires) (Charles Stéphan, 2018) (Desaar, 2015) (Chaht fouzia, 2012)**.**

c. Additifs

Les additifs sont des constituants qui ne figurent pas dans ceux énumérés ci-dessus et qui sont ajoutés pour améliorer la fabrication ou 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 (Frideric, 2014).

Sulfate de calcium

Il est ajouté aux autres constituants du ciment pour réguler la prise (de 3 à 5% du poids du ciment). C'est en général du gypse (sulfate de calcium hydraté $CaSO_4.2H_2O$), de l'anhydrite (sulfate de calcium anhydre $CaSO_4$) ou de l'hémihydrate ($CaSO_4$. ½ H_2O).

Le tableau 1 donne les 27 produits de la famille des ciments courants traités dans la norme NF EN 196-1. Ils sont regroupés en cinq types principaux CEM I, CEM II, CEM III, CEM IV et CEM V. Ces différents types de ciments courants proviennent de la quantité de clinker contenu dans le ciment ainsi que des constituants principaux (autres que le clinker) selon leur nature et leur quantité. (Amel, 2016) (Trauchessec, 2013).

Tableau 1: Différents types de ciments et leurs compositions (FDUS EAS 18-1, 2018)**.**

CLASSIFICATION ET COMPOSITION DES PRINCIPAUX CIMENTS DE LA NORME EN 197-1										
Types	Différentes désignations		Constituants principaux en %							
			Clinker K	Laitier de haut fourneau S	Fumée de silice D	Pouzzolane P ou Q	Cendres volantes V ou W	Schiste calciné T	Calcaire L ou LL	Constituants secondaire
CEM I	Ciment Portland	CEM I	95-100	-	-	-	-	-	-	0-5
CEM II	Ciment Portland au laitier	CEM II/A-S	80-94	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-S	65-79	-	-	-	-	-	-	0-5
	Ciment Portland fumée de silice	CEM II/A-D	90-94	-	6-10	-	-	-	-	0-5
	Ciment Portland à la pouzzolane	CEM II/A-P	80-94	-	-	6-20	-	-	-	0-5
		CEM II/B-P	65-79	-	-	21-35	-	-	-	0-5
		CEM II/A-Q	80-94	-	-	6-20	-	-	-	0-5
		CEM II/B-Q	65-79	-	-	21-35	-	-	-	0-5
	Ciment Portland aux cendres volantes	CEM II/A-V	80-94	-	-	-	6-20	-	-	0-5
		CEM II/B-V	65-79	-	-	-	21-35	-	-	0-5
		CEM II/A-W	80-94	-	-	-	6-20	-	-	0-5
		CEM II/B-W	65-79	-	-	-	21-35	-	-	0-5
	Ciment Portland au schiste calciné	CEM II/A-T	80-94	-	-	-	-	6-20	-	0-5
		CEM II/B-T	65-79	-	-	-	-	21-35	-	0-5
	Ciment Portland au calcaire	CEM II/A-L	80-94	-	-	-	-	-	6-20	0-5
		CEM II/B-L	65-79	-	-	-	-	-	21-35	0-5
		CEM II/A-LL	80-94	-	-	-	-	-	6-20	0-5
		CEM II/B-LL	65-79	-	-	-	-	-	21-35	0-5
	Ciment Portland composé	CEM II/A-M	80-94	6-20						0-5
		CEM II/B-M	65-79	21-35						0-5
CEM III	Ciment de haut fourneau	CEM III/A	35-64	36-65	-	-	-	-	-	0-5
		CEM III/B	20-34	66-90	-	-	-	-	-	0-5
		CEM III/C	5-19	81-95	-	-	-	-	-	0-5
CEM IV	Ciment pouzzolanique	CEM IV/A	65-89	-	11-35			-	-	0-5
		CEM IV/B	45-64	-	36-55			-	-	0-5
CEM V	Ciment composé	CEM V/A	40-64	18-30	-	18-30	-	-	-	0-5
		CEM V/B	20-38	31-50	-	31-50	-	-	-	0-5

II .4.3. Classification des ciments en fonction de leur résistance normale

Les ciments peuvent être classés en fonction de leur résistance normale, c'est-à-dire leur résistance à la compression après un certain nombre de jours de durcissement. La résistance normale d'un ciment est la résistance mécanique à la compression mesurée à 28 jours sur mortier normal conformément à la norme NF EN 196-1 et exprimée en MPa.

Pour l'ensemble des ciments, les propriétés des liants (mécanique, composition chimique, etc.) doivent répondre à certaines exigences (Ludwig & Zhang, 2015). Les ciments sont alors labélisés selon les normes européennes. La résistance en compression sur mortiers normalisé à 28 jours (NF EN 196-1) est un des critères importants permettant de classer les ciments (tableau 3 : classes 32,5, 42,5 et 52,5). En complément de la classe de résistance à 28 jours, les lettres N ou R indiquent si le ciment présente une résistance élevée (R) ou normale (N) à court terme (2 jours ou 7 jours) (Trauchessec, 2013).

Tableau 2: Classe de résistance du ciment (Nadjia, 2022)

Classe de resistance	Résistance à la compression Mpa				Temps de début de prise	Stabilité (expansion)
	Résistance à court terme		Résistance courante			
	2 jours	7 jours	28 jours		min	Mm
32.5 L [a)]	---	≥ 12.0	≥32.5	≤52.5	≥ 75	≤ 10
32.5 N	---	≥ 16.0				
32.5R	≥ 10.0	---				
42.5 L [a)]	---	≥ 16.0	≥ 42.5	≤62.5	≥ 60	
42.5 N	≥ 10.0	---				
42.5 R	≥ 20.0	---				
52.5 L [a)]	≥ 10.0	---	≥52.5	---	≥ 45	
52.5 N	≥ 20.0	---				
52.5 R	≥ 30.0	---				
a) classe de résistance uniquement définie pour les ciments CEMIII						

En France, la désignation des ciments indique également des caractéristiques complémentaires :

- ES ou PM : pour des ciments contenant moins de C3A et de sulfates (Vignes et al., 1996). Ces ciments sont alors destinés aux milieux agressifs (ES : eaux à haute teneur sulfatée et PM : eaux riche en chlorures) ;
- CP : signifie que la teneur en ions sulfures est limitée pour la fabrication de bétons précontraints ;
- LH : ciment à faible dégagement de chaleur utilisé par exemple pour la fabrication d'ouvrages massifs (Trauchessec, 2013**)**.

II.5. Différents procédés de fabrication des types de ciment

La fabrication du ciment est un processus complexe qui nécessite un savoir-faire, une maîtrise des outils, des techniques de production et des contrôles stricts pour obtenir une haute qualité. Comme nous le savons, pour fabriquer du ciment, il faut combiner quatre éléments principaux selon des dosages prédéterminés : chaux, silice, alumine et oxyde de fer. L'élément prédominant est le calcaire. Tous ces éléments, dits cru, sont traités selon des étapes élaborées (souvent par voie sèche) (Ben Sahnoune, 2021).

II.5.1. Principales phases du ciment portland

Le ciment Portland est constitué de quatre phases principales nommées C3S, C2S, C3A, et C4AF et d'autres phases minoritaires (Ali et al., 2008b). Ces phases ne sont pas pures et contiennent des ions étrangers qui entraînent une altération de leurs structures cristallines (Hajar, 2011).

II .5.2. Procédés de fabrication du ciment

Il existe 4 types de procédés différents, la voie sèche, la voie humide, et 2 procédés intermédiaires appelés voie semi- sèche et voie semi-humide (Frideric, 2014).

- La voie sèche traite des « farines », issues du broyage de calcaires durs contenant initialement peu d'humidité. Le cru reste sec tout au long de son parcours jusqu'au four, et passe dans des cyclones, obligeant la matière à circuler dans le sens opposé aux gaz chauds issus du four, permettant une bonne homogénéisation des constituants et une décarbonatation du calcaire (Chaht fouzia, 2012).
- La voie humide, au contraire, concerne des pierres tendres souvent riches en eau, comme la craie. L'homogénéisation a lieu en phase humide, sous la forme d'une pâte assez liquide (environ 30 % d'eau), introduite directement dans le four. La voie humide consomme beaucoup d'énergie (une partie sert à l'évaporation de l'eau de la pâte). Ce procédé a quasiment disparu, remplacé par des fours à voie sèche, moins voraces en combustible.

  Pour cette raison, les fours à voie humide sont très longs, souvent supérieurs à 200 mètres, contre 60 mètres environ pour les fours à voie sèche (Nadjia, 2022).

- La voie semi-humide consiste à extraire physiquement l'eau de la pâte par pressage. On obtient une sorte de pâte à modeler, qui, après broyage et séchage, donne une farine, qui rentre dans un cyclone et/ou un four de voie sèche (Chaht fouzia, 2012).
- La voie semi-sèche, à l'inverse, consiste à humidifier la farine pour créer des granules (étape de granulation), de petites boulettes qui sont introduites sur une grille dite « Lepol », à travers laquelle circule un flux d'air chaud servant à décarbonater la matière. Le poids des granules permet à ceux-ci de ne pas être emportés par le flux d'air, ce qui se passerait si l'on se servait de farine. Le choix du procédé à utiliser dépend largement de l'état des matières premières : sèches ou humides (Ben Sahnoune, 2021).

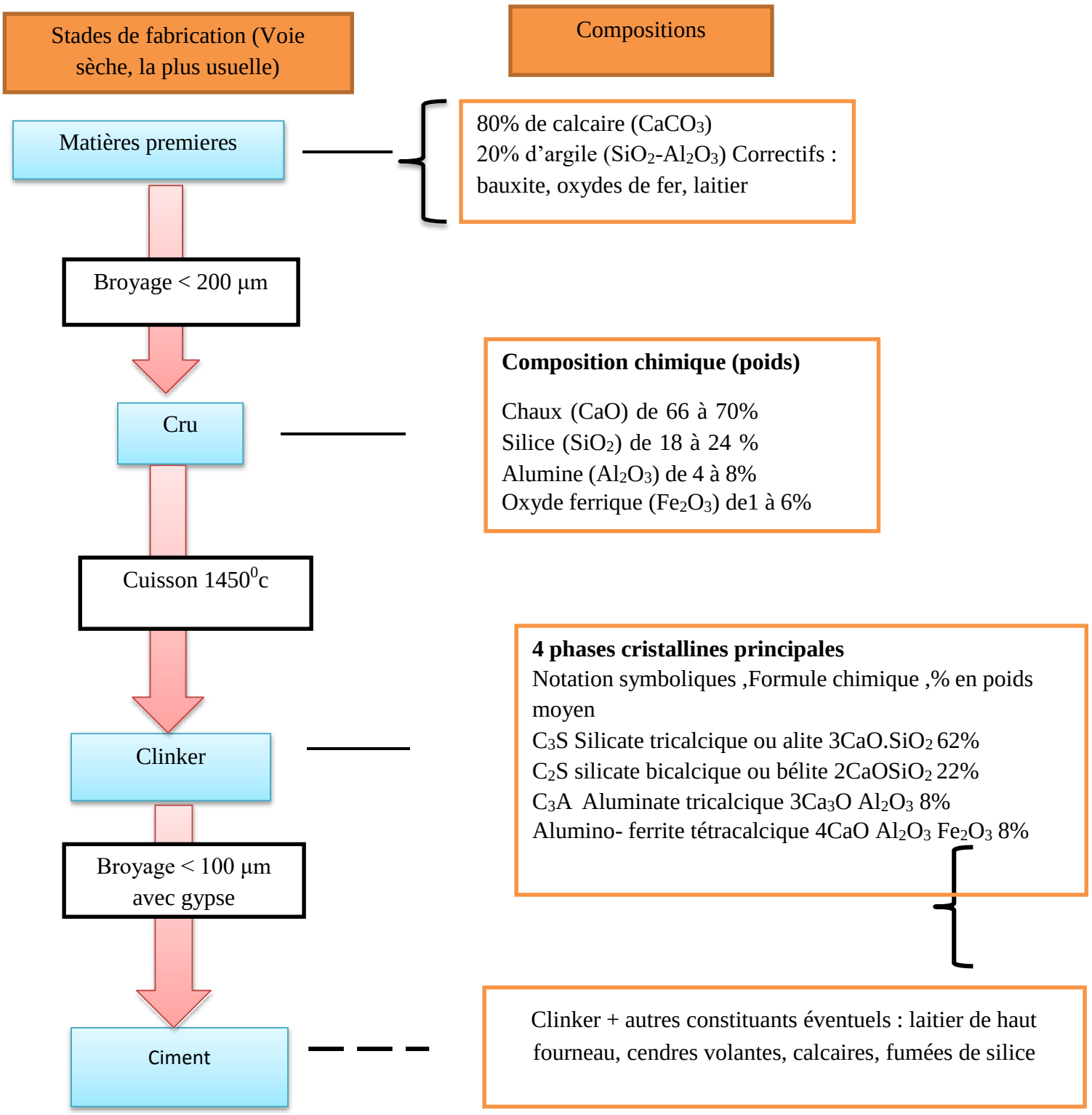


Figure 1: Description des étapes de fabrication du ciment par voie sèche (Frideric, 2014)

II.5.3. Principe de fabrication du ciment Portland

Le ciment est produit à partir des roches facilement accessibles : calcaire, marbre et argile. De façon générale, un mélange renferme environ 80% de calcaire et 20% d'argile. Le mélange finement broyé est porté à 1450°C dans un four rotatif pour produire le clinker. Le ciment résulte d'un broyage très fin du clinker. Lors de la phase de broyage, du gypse (5% en poids) est ajouté pour mieux maîtriser le temps de prise (Schneider et al., 2011). A ce niveau, d'autres constituants minéraux sont ajoutés comme la pouzzolane naturelle, les cendres volantes, les laitiers de hauts fourneaux, le calcaire etc.

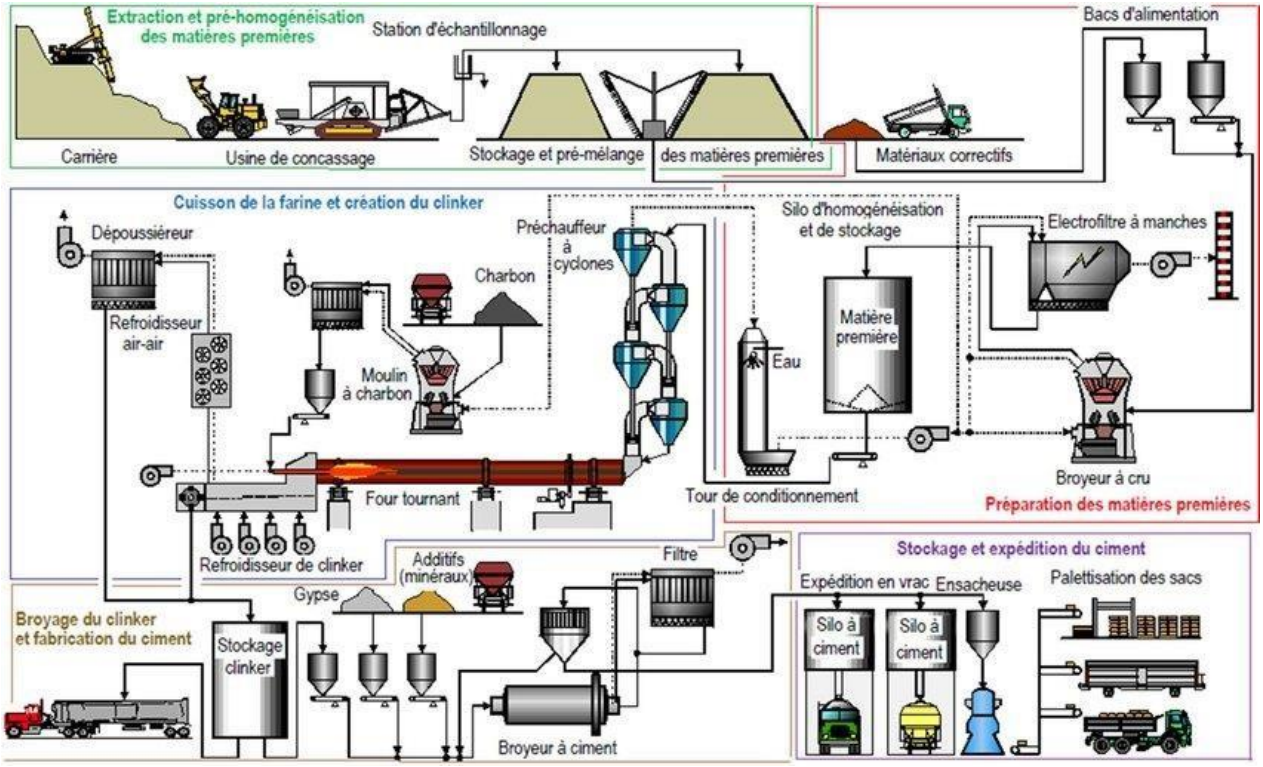


Figure 2: Fabrication du ciment, schéma de principe (Sánchez Berriel et al., 2016)

Le composé de base des ciments courants est un mélange de silicates et d'aluminates de calcium résultant de la combinaison de la chaux (CaO) avec la silice (SiO_2), l'alumine (Al_2O_3), et l'oxyde de fer (Fe_2O_3). La chaux nécessaire est apportée par des roches calcaires, l'alumine, la silice et l'oxyde de fer par des argiles. Les matériaux se trouvent dans la nature sous forme de calcaire, argile ou marne et contiennent en plus des oxydes déjà mentionnés, d'autres oxydes et en particulier l'oxyde ferrique Fe_2O_3.

Le principe de fabrication du ciment est le suivant : calcaires et argiles sont extraits des carrières, puis concassés, homogénéisés, portés à haute température (1450 °C) dans un four illustrés par les figures 1 et 2. Le produit obtenu après refroidissement rapide (la trempe) est le clinker (Achraf & Med nadire, 2018).

Au début, on provoque le départ de l'eau de mouillage, puis au-delà de 100 °C, le départ d'eau d'avantage liée. A partir de 400°C commence la composition en gaz carbonique (CO_2) et en chaux (CaO) et du calcaire qui est le carbonate de calcium ($CaCO_3$).

Le mélange est porté à 1450-1550 °C, température de fusion. Le liquide ainsi obtenu permet l'obtention des différentes réactions. On suppose que les composants du ciment sont formés de la façon suivante : une partie de CaO est retenue par l'Al_2O_3 et le Fe_2O_3 en formant une masse liquide. Le SiO_2 et le CaO restant réagissent pour donner le silicate bicalcique dont une partie se transforme en silicate tricalcique dans la mesure où il reste encore du CaO non combiné (Lwiza, 2016).

Le clinker se retrouve sous forme de billes ayant un diamètre de 3 à 25 mm. Par la suite, le clinker est refroidi et broyé, puis on ajoute une faible quantité de gypse (environ 3 % de la masse de ciment) pour contrôler la prise du ciment. Le produit ainsi obtenu constitue le ciment Portland (Achraf & Med nadire, 2018).

II.5.4. Matières premières

Les matières premières pour la fabrication d'un ciment Portland sont extraites des roches naturelles (calcaire, marne et argile...) source des éléments chimiques Ca, Si, Al et Fe nécessaires à la formation des silicates et aluminates du clinker illustrés par la figure 1.

Le calcaire apporte le calcium ; l'argile apporte la silice SiO_2, l'alumine Al_2O_3, et l'oxyde ferrique Fe_2O_3 (Okumu et al., 2017), nécessaire pour le processus de formation du clinker. Ces matières premières contiennent par ailleurs d'autres éléments que ces oxydes fondamentaux, tels de la magnésie MgO, des sulfates, des sulfures, des alcalins K_2O et Na_2O. (Nadjia, 2022).

Les matières premières qui sont dans le processus d'obtention du produit final mélangé avec du clinker sont le gypse et des additifs tels que la pouzzolane naturelle et synthétique, laitier de haut fourneau, le calcaire et autres (Ben Sahnoune, 2021).

II.6. Etapes de la fabrication du ciment Portland

II.6.1. Carrier

Le carrier en cimenterie constitue la source en matières premières qui subirent des transformations pour fabriquer le produit fini donc le ciment est fabriqué à partir de quatre composantes chimiques principales : Carbonates de calcium, alumine, silice et oxyde de fer (Schneider et al., 2011). Ces éléments se trouvent généralement dans la nature sous forme de calcaire, d'argiles, de minerai de fer et de Sable.

II.6.2. Concassage

Le concasseur a pour un rôle de ramener les matières premières à des dimensions admissibles pour le broyeur. Les matières premières sont fournies par les carrières en gros morceaux avec leur humidité naturelle et doivent être séchées puis concassés à la granulométrie désirée (0 – 25 mm). Les pierres arrivent généralement à l'usine en gros blocs et avec leur humidité de carrière, et il faut d'abord les concasser, puis les sécher, ou au contraire les délayer, avant de les passer au broyeur (Thibaudon et al., 2019).

II.6. 3. Stockage de matière première

Après l'opération de concassage de ces trois constituants de base on obtient une granulométrie de 0 à 25 mm, les constituant sont acheminés vers le stock primaire (hall de stockage) par des tapis roulant couvert, pour la pré homogénéisation : un hall avec un stockage circulaire pour le calcaire et un hall à stockage linéaire pour l'argile, le sable et minerai de fer (FDUS EAS 18-1, 2018).

II.6 .4. Pré-homogénéisation

Le cru est un mélange homogène de calcaire et d'argile, de minerais de fer et de sable. Les proportions sont déterminées selon leurs compositions chimiques et sont toujours proches, de 75 % de calcaire et 15% d'argile, 5 % de fer et 3% de sable. Le mélange est broyé en une poudre de granulométrie inférieure à 90 microns.

La poudre obtenue est homogénéisée par un mélangeur pneumatique (un suppresseur pour la fluidisation et un compresseur pour l'homogénéisation. Le produit obtenu est appelé la farine cru « le cru » (FDUS EAS 18-1, 2018).

II .6.5. Broyage et séchage

Les matières premières pré homogénéisées doivent être finement broyées dans des broyeurs à boulets ou des broyeurs à meules verticaux (Schneider et al., 2011), pour être chimiquement plus réactives au cours de leur cuisson dans le four. Dans la voie sèche et demi-sèche, elles sont broyées en une fine poudre et séchées principalement en utilisant les gaz chauds du four et/ou l'air d'exhaure du refroidisseur. Le broyage humide est réservé aux matières premières préparées en voie humide ou semi-humide. Ses composants sont broyés avec de l'eau pour former une pâte.

II .6.6. Homogénéisation

En sortant du broyeur, le cru doit être malaxé pour que le mélange acquière sa rhéologie optimale avant introduction dans les différents types de four. Le cru est homogénéisé et stocké généralement dans deux silos d'homogénéisation en béton.

Les caractéristiques chimiques du cru :

La composition du cru doit répondre à des caractéristiques chimiques déterminées dans sa composition et dont les proportions sont (Charles Stéphan, 2018):

- Chaux (Ca O) : 65 -70% ;
- Silice (Si O_2) :18-24 %11 ;
- Alumine (Al_2O_3) : 4-8 % ;
- Oxyde ferrique (Fe_2O_3) :1-16 %.

A savoir :

- Le magnésique (MgO), lorsqu'il dépasse 3% dans les matières crues, génèreras des gonflements entrainant une diminution des caractéristiques mécaniques du béton ;
- En faible quantités, les substances naturelles suivantes peuvent être utilisées pour la correction du cru exigé par le procédé de fabrication ;
- Minerai de fer ((Fe_2O_3) ;
- Bauxite (Al_2O_3) ;
- Calcaire pur (CaO) ;
- Sable (Si O_2) (Vignes et al., 1996).

II.6.7. Zone de cuisson

a. Tour de préchauffage

Les gaz réchauffent la poudre crue qui circule dans les cyclones en sens inverse, par gravité. La poudre s'échauffe ainsi jusqu'à 800 °C environ et perd donc son gaz carbonique (CO_2) et son eau. (Ben Sahnoune, 2021).

La farine crue introduite contient encore 1% d'humidité et le courant gazeux dont la température est d'environ 350°c sert au séchage de la farine. Séparée des gaz à chaque traversé de cyclone, la matière est à chaque fois réinsérée à l'étage suivant (au-dessous) et reprise par des gaz de plus en plus chaud donc elle se réchauffe (Amel, 2016) (Sawadogo, 2021).

b. Cuisson

Les fours utilisés pour l'obtention du clinker (en anglais : scories) sont de forme cylindrique, ils tournent lentement à 2 ou 3 tours par minute et sont longs d'environ 100 mètres (leur longueur est plus importante si la voie humide est utilisée) et de diamètre environ 5 mètres. Ils sont légèrement inclinés par rapport à l'horizontale de telle sorte que le cru entre par la partie la plus haute du four (Charles Stéphan, 2018).

Le brûleur est situé au fond du four et produit une flamme à environ 2000°C. Il s'établit un gradient thermique entre l'entrée du four et la sortie de celui-ci de 800°C à 1500°C environ. Avant d'entrer dans le four, le cru sous forme de poudre traverse un échangeur de chaleur dans lequel circulent en sens inverse les gaz très chauds qui s'échappent du four. Le cru est donc préchauffé à une température d'environ 800°C quand il atteint le début du four. La durée de séjour dans le four est d'environ une demi-heure (Ben Sahnoune, 2021).

A partir de 650°C environ, la première réaction de transformation de clinkérisation commence à se produire. Le carbonate de calcium issu du calcaire subit une réaction de décarbonatation selon la formule suivante :

$CaCO_3 \rightarrow CaO + CO_2$

On obtient alors de la chaux vive (CaO) accompagnée d'un important dégagement gazeux de CO_2.

Sous l'effet de la chaleur, on observe une scission de l'argile en silice (SiO_2), en alumine (Al_2O_3) et en oxyde de fer (Fe_2O_3). A partir d'environ 1300°C les réactions de clinkérisation se poursuivent (Charles Stéphan, 2018)**.**

Oxyde de fer (Fe_2O_3) + alumine (Al_2O_3) + oxyde de calcium (CaO) → aluminoferrite tétracalcique ($Ca_4Al_2Fe_2O_{10}$).
Alumine (Al_2O_3) + chaux vive (CaO) → aluminate tricalcique ($Ca_3Al_2O_6$).

Ces deux composés nouvellement formés constituent la phase liquide du mélange qui continue de progresser vers la partie la plus chaude du four. La silice (SiO_2) et la chaux vive (CaO) restant se dissolvent dans cette phase et réagissent entre-elles selon la réaction suivante :

Silice (SiO_2) + chaux vive (CaO) → silicate bicalcique (Ca_2SiO_4)

La réaction peut se poursuivre éventuellement s'il reste de l'oxyde de calcium (CaO) qui n'a pas encore réagi : Silicate bicalcique (Ca_2SiO_4) + chaux vive (CaO) → silicate tricalcique (Ca_3SiO_5) (Ben Sahnoune, 2021).

La température de la matière monte jusqu'à 1450 °C. Une partie de la matière fond pour donner naissance à la phase liquide (constituée de phase aluminate et ferrite), cette étape demande beaucoup d'énergie.
En parallèle, il y a formation de C3S (silicate tricalcique) : à partir de 1300 °C, le C2S se transforme en C_3S en réagissant avec une partie du CaO non combiné.
La réaction est exothermique (Mohamed, 2016).

Si la phase liquide n'existait pas, il faudrait chauffer d'avantage le four afin d'atteindre la température de fusion de la silice qui est d'environ 1900°C pour que ces deux réactions aient lieux.

A la sortie du four, les nodules incandescents sont brusquement refroidis à 100°C.

Tableau 3: Composition minéralogique du clinker (Mounsif, 2018).

Nom	Formules	Minimum	Maximum
Alite (silicate tricalcique)	Ca_3SiO_5	45.0 %	79.7 %
Bélite (silicate bicalcique)	Ca_2SiO_4	5.7 %	29.8 %
Aluminate tricalcique	$Ca_3Al_2O_6$	1.1 %	14.9 %
Aluminoferrite tétracalcique	$Ca_4Al_2Fe_2O_{10}$	2.0 %	16.5 %
Chaux libre	CaO	0.6 %	2.8 %

II.6.8. Refroidissement

Le refroidisseur a pour rôle d'abaisser la température du clinker tombant du four à une température d'environ 1135°C jusqu'à 80-100°C. Il est équipé d'une batterie de ventilateurs fournissant l'air de refroidissement (Matschei et al., 2007a).

A la sortie du four après la fin du cycle de cuisson, le clinker se présente sous forme de granulées gris et doit être refroidit brutalement (cette opération s'appelle la trempe). Le clinker est brusquement refroidi par projection d'air ramenant à une température d'environ 100°C en quelque minute. Il existe deux types de refroidisseurs basés sur le même principe que le four relatif, mais l'échange de chaleur se fait en sens inverse

• Refroidisseur à grille mobile ;

• Refroidisseur à grille retournement.



Figure 3: Aspect du clinker après refroidissement (Mounsif, 2018)

II.6.9. Stockage du clinker et broyage du ciment

Le clinker refroidi est stocké dans un hall couvert ou dans des silos. Le clinker est finement broyé dans un broyeur à boulets avec d'autres ajouts : gypse, calcaire et cendres volantes selon le type de ciment produit. Le gypse est un régulateur de temps de prise, le calcaire et les cendres volantes sont des additifs pour améliorer la résistance du produit, et le broyage est destiné d'une part à réduire les granulats de clinker en poudre et d'autre part à fabriquer divers ajouts pour obtenir un produit final prêt à être commercialisé (Gueddour afef, 2013)(Mohamed, 2016).



Figure 4: Poudres du ciment

II.7. Principales caractéristiques de ciment

Un ciment est caractérisé par un certain nombre de critères mesurés de façon conventionnelle, soit sur la poudre, soit sur pâte, soit sur « mortier normal » (mélange normalisé de ciment, sable et eau défini par la norme NF EN 196-1). Ces critères constituent les caractéristiques du ciment. Elles sont d'ordre chimique, minéralogique, physique et mécanique (Frideric, 2014).

II.7.1. Caractéristiques chimiques

a. Hydratation de ciment

L'ajout de l'eau à du ciment donne un fluide qui se transforme assez rapidement en une masse durcie. Cette transformation est obtenue grâce à l'hydratation du ciment. Cette hydratation est un ensemble de réactions chimiques qui interviennent dès le début de gâchage et qui se poursuivent dans le temps, pendant plusieurs mois (Hökfors et al., 2015).

b. Hydratation du silicate tricalcique (C_3S)

Le silicate tricalcique ou alite est le principal constituant du ciment, il représente 40 à 80 % en teneur massique et il est souvent impur dans le clinker (Derouich, 2018). Cette phase est très importante pour le développement de la résistance mécanique au jeune âge du ciment. La phase C3S est instable et elle n'est obtenue que grâce à une trempe rapide du clinker à la sortie du four.
Lorsqu'on ajoute de l'eau, différents ions se dissolvent ; cette hydratation génère deux formes d'hydrates : la portlandite et une phase hydratée de type C-S-H selon l'équation (Derouich, 2018) :

2 C3S + 6 H $\longrightarrow$ C3S2H3 (CSH) +3 CH (portlandite)

c. Hydratation du silicate bicalcique (C_2S)

Le silicate bicalcique se comporte comme le silicate tricalcique en donnant des C-S-H semblables avec une certaine différence dans la microstructure (Matschei et al., 2007b). Cependant, les principales différences résident dans l'absence d'une sursaturation marquée en portlandite et dans un flux de libération de chaleur plus faible. Si le degré de sursaturation est en relation avec la germination du portlandien, la faible sursaturation autour des grains de C_2S peut expliquer sa réactivité moins importante par rapport à celle du C_3S au jeune âge.

d. Hydratation de l'aluminate tricalcique (C_3A)

Les études portant sur l'hydratation du C_3A montrent clairement l'influence de cette réaction sur le comportement rhéologique initial du ciment (Ali et al., 2008b). Contrairement aux phases silicatées, le sulfate de calcium joue un rôle crucial sur l'hydratation du C_3A et les hydrates formés sont différents (Morphologie, structure, composition) selon que le processus d'hydratation a lieu en absence ou en présence de « gypse »(Ayotunde Akanni et al., 2020).
En absence de « gypse », une réaction accélérée se produit et conduit à la formation d'aluminates hydratés hexagonaux suivant la réaction :

$2C_3A + 21H \longrightarrow C_4AH_{13}$ (instable) + C_2AH_8

Ces hydrates hexagonaux ne sont pas stables et se transforment au cours du temps sous l'action de la chaleur d'hydratation du C3A en hydrate cubique C_3AH_6, plus stable, suivant la réaction :

$C_4AH_{13} + C_2AH_8 \longrightarrow 2\ C_3AH_6$ (stable) + 9 H

Ces réactions sont la cause principale de la prise rapide des ciments Portland lorsque la quantité de « gypse » présente dans le ciment est insuffisante.

e. Hydratation de l'aluminoferrite tétra calcique (C_4AF)

L'hydratation du C_4AF est similaire à celle du C_3A. Cependant, le C_4AF réagit moins vite que le C_3A. Son hydratation n'est toujours pas totalement élucidée et est souvent ignorée dans les publications portant sur l'hydratation des ciments (Inam et al., 2022). Les réactions mises en jeu lors de l'hydratation sont les suivantes :

- Sans gypse : $C_4AF + 13H \longrightarrow C_4(AF)\ H_{13}$
- Avec gypse: $C_4AF + CsH_2 + 12\ H \longrightarrow C_4\ (AF)\ CsH_{14}$

II 7. 2. Caractéristiques physiques

a. La couleur

Elle varie avec la composition chimique des matières premières (particulièrement la teneur en oxydes de fer) et la nature des combustibles utilisés pour la fabrication du clinker.
Généralement, elle est grise (Frideric, 2014).

b. Finesse

C'est la surface spécifique du ciment ou bien la surface totale des grains contenus dans une unité de masse exprimée en m^2 /Kg de poudre. L'étude de la finesse ou surface spécifique du ciment est d'autant plus nécessaire puisqu'elle a une influence directe sur les propriétés mécaniques et rhéologiques du mortier et béton. Elle est calculée en fonction du temps au moyen de l'appareil de Blaine ou « perméabilimétre de Blaine » (Trauchessec, 2013)**.**

c. Consistance

La consistance normale caractérise la propriété rhéologique des pâtes. Elle est déterminée par la méthode décrite par la norme « NA 229 » qui consiste en la détermination de la quantité d'eau qu'il faut ajouter à une quantité de ciment préalablement pesée pour obtenir une pâte ciment (Ben Sahnoune, 2021).

d. Temps de prise

Le début ou la fin de prise dépend de plusieurs paramètres, il varie notamment suivant la composition chimique et la finesse de mouture de ciment étudié, il dépend aussi de la température ambiante et, le cas échéant, des dosages en adjuvant, utilisés à une même température et sans adjuvant, deux ciments différents pourront se distinguer, par une plus ou moins grande rapidité de prise (Chaht fouzia, 2012).

e. Durcissement

C'est la période qui suit la prise et pendant laquelle se poursuit l'hydratation du ciment. Sa durée se prolonge pendant des mois au cours desquels les résistances mécaniques continuent à augmenter.

Comme le phénomène de prise, le durcissement est sensible à la température, ce qui conduit notamment en préfabrication, à chauffer les pièces pour lesquelles on désire avoir des résistances élevées au bout de quelques heures (Frideric, 2014).

f. Refus

La détermination du pourcentage des refus de ciment se fait après le broyage. Les refus sont déterminés pour contrôler l'état de fonctionnement du broyeur et le degré du broyage.

II.7.3. Caractéristiques mécaniques

Elles sont définies par la capacité d'un matériau à résister à toute sollicitation extérieure impliquant une force. La plus importante, pour les ciments, est la résistance à la compression simple. Quelque fois il y a lieu de déterminer la résistance à la traction par flexion et la résistance à l'usure (Sana, 2020).

Les résistances mécaniques des ciments sont déterminées par les essais sur mortier dit "normal", à 28 jours d'âges en traction et en compression des éprouvettes 4 x 4 x 16 cm. La résistance du mortier est alors considérée comme significative de la résistance du ciment. Elle dépend de la classe de ciment et est exprimée en MPa. Le mortier utilisé est réalisé conformément à la norme EN 196-1. Le sable utilisé est un sable appelé "sable normalisé EN 196-1".Pour chaque type de ciment, il existe effectivement plusieurs classes de résistances pour lesquelles les fabricants garantissent des valeurs minimales et maximales (Frideric, 2014).

CHAPITRE III : MATERIELS ET METHODE D'ANALYSE

III. 1. Matériels et échantillonnage

III.1.1. Description des échantillons

Les échantillons de trois types des ciments, DANGOTE 42.5R, BUCECO 32.5R et GLC 42.5N ont été achetés au marché de la Mairie de Bujumbura. Nous avons acheté aléatoirement un sac de 50 kg pour chaque type de ciment. Nous avons pris un kg comme échantillon pour représenter la totalité d'un sac pour chaque type de ciment. Les échantillons représentatifs ont été acheminés dans le laboratoire de l'Office Burundais des Mines et carrières pour faire l'analyse chimiques. Après avoir été amenés au laboratoire, les échantillons ont subi des divers traitements. Les échantillons doivent d'abord passer dans la salle d'accueil des échantillons pour l'enregistrement. L'OBM reçoit les échantillons en provenance des clients et celles de l'Office. Chaque catégorie d'échantillon a un registre approprié. L'enregistrement est lié à l'identification de l'échantillon en lui donnant le numéro de laboratoire qui restera inchangé à la période d'analyse. Nous avons préparé les échantillons pour les mettre dans un état adéquat pour l'analyse chimique. Les étapes de la préparation des échantillons sont les suivantes :

- Pesée de l'échantillon : nous avons pèse pour connaitre la quantité de l'échantillon,

- Broyage : c'est la réduction de la taille de l'échantillon dans le but d'obtenir la poudre très fine de taille inférieure à 75µm de diamètre. On broie l'échantillon à l'aide d'un broyeur électrique

- Quartage : c'est l'opération de réduction du volume de l'échantillon à l'aide d'un quarteur en gardant tous les éléments représentant la totalité de l'échantillon.

Pour éviter la contamination de l'échantillon dans ces étapes, nous avons nettoyé le matériel avec de l'air comprimé fourni par le compresseur.

III.1.2. Equipements d'analyse

Les matériels de laboratoire utiles lors de l'analyse chimiques sont constitués par :

- Balance analytique,
- Quarteur,
- Broyeur de marque ROCK LABS
- Homogénéisateur électrique de marque GLEN CRESTON MIXER, MILL 800 M,
- Presse hydraulique de marque MP250,
- XRF de marque RIGAKU Super mini200.

III.1.3. Préparation des pastilles d'échantillons

Pour préparer la pastille, nous avons pesé 8g de l'échantillon représentatif soigneusement broyés. Nous avons ajoute 2g de Wax qui joue le rôle d'un liant 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) qui va agiter pendant 5 min afin que l'échantillon et le Wax soient bien homogénéisés. Ensuite on verse ce mélange dans le moule à pastilles et on presse par une presse hydraulique MP 250 à 20 tonnes /cm^3. L'appareil est électronique et son arrêt est automatique. Enfin, la pastille comprimée est démoulée puis conservée dans un sachet transparent sans oublier de marquer le numéro de laboratoire de l'échantillon.



Figure 5: Presse hydraulique de marque MP250

III.2. Méthodes d'analyses chimiques

Les méthodes d'analyse chimique ont été utilisées pour déterminer la composition chimique du ciment et évaluer la présence et la quantité de différents constituants. Ces informations sont essentielles pour évaluer la qualité, la performance et les propriétés du ciment.

III.2.1. Détermination de la composition chimique par XRF

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. Elle permet l'analyse de tous les éléments chimiques, du Béryllium (Be) à l'Uranium (U) dans des gammes de concentration allant de quelques ppm à 100%, avec des résultats précis et surtout reproductibles (Thirion-Merle, 2014).

L'échantillon à analyser est placé sous un faisceau de rayons X. Sous l'effet de ces rayons X, les atomes constituant l'échantillon passent de leur état fondamental à un état excité.

L'état excité est instable, les atomes tendent alors à revenir à l'état fondamental en libérant de l'énergie, sous forme de photons X notamment. Chaque atome, ayant une configuration électronique propre, va émettre des photons d'énergie et de longueur d'onde propres. C'est le phénomène de fluorescence X qui est une émission secondaire de rayons X, caractéristiques des atomes qui constituent l'échantillon. L'analyse de ce rayonnement X secondaire permet à la fois de connaitre la nature des éléments chimiques présents dans un échantillon ainsi que leur concentration massique (Thirion-Merle, 2014).

Pour déterminer la composition chimiques en oxydes dans les ciments, on a utilisé un appareil de marque RIGAKU Supermini200, ou l'échantillon est irradié par un faisceau de rayon X produit par le tube cathodique, chaque élément constituant l'échantillon émet ses propres radiations de fluorescence.

Le faisceau de radiation est ensuite dirigé par le collimateur (deux positions, l'une fine et l'autre large) vers le cristal analyseur qui va diffracter chaque radiation de longueur d'onde donnée dans un angle correspondant de façon à satisfaire la loi de BRAGG. Pour s'assurer que l'appareil est un bon état on fait la calibration de la machine en analysant la pastille(en oxyde de titane) qui est en provenance du fabriquant de l'appareil. L'analyse a été effectuée au laboratoire de l'OBM.



Figure 6: Spectromètre XRF séquentielle de paillasse de marque RIGAKU Supermini200

III.2.2. Calcul des paramètres d'indice de la qualité et la détermination de la composition minérale par calcul de Bogue

a. Calcul des paramètres d'indice de la qualité

(i). Hydraulicité

C'est une grandeur qui permet d'évaluer le caractère hydraulique d'un liant. Elle est définie par l'indice d'hydraulicité i:

$$I = \frac{SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3}{CaO + MgO}$$

L'indice d'hydraulicité représente le rapport entre la somme des constituants acides et celle des constituants basiques du liant.

L'hydraulicité est une propriété importante car elle permet au matériau liant de durcir même en présence d'eau. Cela signifie que le matériau peut être utilisé dans des environnements humides ou en contact avec l'eau sans perdre ses propriétés de solidité et de cohésion.

(ii). Chaux de saturation

C'est la quantité maximale de chaux susceptible d'être fixée par les constituants acides (SiO_2, Al_2O_3 et Fe_2O_3) contenus dans le mélange.

Deux cas peuvent se présenter :

-Si le mélange est riche en alumine (mélange normal), on utilisera la formule :

$CaOsat = 2,80SiO_2 + 1,65Al_2O_3 + 0,35Fe_2O_3$

-Si le mélange est riche en oxyde de fer, on utilisera la formule :

$CaOsat = 2,80SiO_2 + 1,10Al_2O_3 + 0,70Fe_2O_3$

(iii). Modules et valeurs requises

Tout ciment et tout clinker sont caractérisés par trois grandeurs :

- le module de chaux MC,
- le module de silice MS,
- le module d'alumine ou module oxydique MA.

Ce sont des valeurs requises, en rapport avec la composition minéralogique et les performances mécaniques attendues du ciment (Ahmed et al., 2022).

(iv). Module de chaux MC

C'est le rapport exprimé en pourcentage, de la teneur en chaux du mélange et de la chaux de saturation :

$$MC=\frac{CaO}{CaOsat}\times 100$$

En général, le MC varie de 92 à 103. Pour les ciments Portland courant, le MC varie de 95 à 98.

-Si MC = 100, le mélange contient exactement la quantité de chaux qui peut être fixée par les constituants acides.

-Si MC < 100, toute la chaux est combinée et l'on aura dans le mélange à la fois de C_3S et du C_2S.

-Si MC >100, il existe forcément de la chaux libre dans le mélange.

(v). 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 (Ahmed et al., 2022).

$$MS = \frac{SiO_2}{Al_2O_3 + Fe_2O_3}$$

La valeur du module de silice peut avoir un impact significatif sur les propriétés du ciment final. En général, un module de silice plus élevé indique une teneur plus élevée en silice par rapport à l'alumine. Cela peut conduire à un ciment avec une réactivité plus faible, une prise plus lente et une résistance initiale plus faible. En revanche, un module de silice plus faible indique une teneur plus élevée en alumine, ce qui peut favoriser la réactivité et la résistance du ciment (Elbeyli et al., 2003).

En général, MS varie de 1,8 à 3,4 et pour les ciments Portland courant de 2,2 à 2,5.

(vi). 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.

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

-Si MA $\leq$ 0,638, le mélange est riche en fer

-Si MA > 0,638, le mélange est normal

MA varie, en général, de 1,2 à 2,5 et de 1,5 à 2 pour les ciments Portland courants.

III.2.3. Détermination de la composition minérale : formule de BOGUE

Dans le four, le mélange cru après séchage et décarbonations arrive sous forme de poudre en petites granules dans la zone de cuisson. Les réactions chimiques commencent sous l'effet de la température. L'oxyde de fer se combine à l'oxyde d'aluminium et à l'oxyde de calcium pour former l'aluminoferrite tétra calcique (C_4AF). L'alumine restante réagit avec de l'oxyde de calcium pour former l'aluminoferrite tricalcique (C_3A). Ces deux composants correspondent à la phase liquide.

Les oxydes de silicium et de calcium réagissent ensemble pour former le silicate bicalcique (C_2S) qui, elle-même, se transforme en silicate tricalcique tant qu'il reste de l'oxyde de calcium non combiné (Punmathari et al., 2010). A la sortie du four, ce dernier s'appelle chaux libre. La magnésie ne réagit pas avec les autres constituants. Elle cristallise sous forme de périclase ou reste en solution solide dans la phase liquide. Les alcalis et les sulfates forment les sulfates alcalins ou réagissent avec l'aluminate tricalcique pour donner des cristaux d'alcalialuminate. Les métaux lourds peuvent remplacer le fer dans certains cristaux.

Une variation des constituants principaux (oxydes de calcium, de silicium, de fer et aluminium) ou des éléments mineurs et secondaires (alcalis, sulfate, titane, phosphate, Fluor,…) modifie d'une part, l'aptitude à la cuisson du mélange cru et, d'autre part, les caractéristiques hydrauliques du ciment produit (Charles Stéphan, 2018).

Les principaux constituants minéralogiques du clinker et/ou du ciment sont par ordre d'apparition C_4AF, C_3A ou C_2F, C_2S et C_3S (Stutzman et al., 2014). De plus comme la cuisson n'est jamais parfaite, le ciment ou le clinker peut contenir de la chaux libre.

Les systèmes d'équations établies par BOGUE permettent d'établir la composition minéralogique du ciment ou du clinker en utilisant les résultats d'analyse par XRF et la teneur en chaux libre (Stutzman et al., 2014),(Prince U & Munachiso C, 2022). L'ensemble de ces équations appelé formule de Bogue vérifie le principe de combinaison de la chaux avec les constituants acides (Taylor, 1989).

L'application de la formule de BOGUE considère quatre cas possibles de mélange :

Quantité insuffisante de chaux: MC ≤ 90

Système C_2S-C_3A-C_5A_3-C_4AF

$C_2S = 2,87\ SiO_2$

$C_3A = 3,61CaO – 6,74\ SiO_2 – 3,81\ Al_2O_3 – 2,96\ Fe_2O_3$

$C_5A_3 = 4,88\ SiO_2 + 4,31\ Al_2O_3 + 0,92\ Fe_2O_3 – 2,61\ CaO$

$C_4AF = 3,04\ Fe_2O_3$

Théoriquement, il n'y a pas de chaux libre et tout le C_2S ne peut se transformer en C_3S.

Cas d'un mélange normal: 90 < MC ≤ 100 ; MA > 0,638

Système C_3S-C_2S-C_3A-C_4AF

$C_3S = 4,07CaO – 7,61SiO_2 – 6,72Al_2O_3 – 1,43Fe_2O_3$

$C_2S = 2, 87\ SiO_2 – 0,75C_3S$

$C_3A = 2,65Al_2O_3 – 1,69Fe_2O_3$

$C_4AF = 3,04\ Fe_2O_3$

Théoriquement, il n'y a pas de chaux libre (Stutzman et al., 2014) (Prince U & Munachiso C, 2022) (Taylor, 1989).

Cas d'un excès de chaux: MC > 100 ; MA > 0,638

Système CaO-C_3S-C_3A-C_4AF

$C_3S = 3,80SiO_2$

$C_3A = 2,65Al_2O_3 – 1,69Fe_2O_3$

$C_4AF = 3, 04\ Fe_2O_3$

CaOL = CaO – CaOsat

Théoriquement tout C_2S est transformé en C_3S et il existe de chaux libre (Almabrok & Bin Khashin, 2019).

Cas d'un mélange riche en fer: 90 < MC ≤ 100 ; MA < 0,638

Système C_3S-C_2S-C_2F-C_4AF

$C_3S = 4,07CaO – 7,61SiO_2 – 4,48Al_2O_3 – 2,86Fe_2O_3$

$C_2S = 2, 87\ SiO_2 – 0,75C_3S$

$C_2F = 1,70Fe_2O_3 – 2,67Al_2O_3$

$C_4AF = 4,77Al_2O_3$

III.2.4. Présences d'autres substances influençant la qualité du ciment

Outre que les oxydes principaux, plusieurs substances peuvent influencer la qualité du ciment. Voici quelques exemples :

Sulfates : Les sulfates peuvent affecter la prise et le durcissement du ciment. Des quantités excessives de sulfates peuvent provoquer des problèmes tels que la réduction de la résistance et l'augmentation de la fissuration. Les limites acceptables de sulfates dans le ciment sont généralement définies par les normes nationales ou régionales.

Chlorures : Les chlorures peuvent provoquer la corrosion des armatures métalliques dans le béton, ce qui peut entraîner des dommages structurels. Les limites de chlorures dans le ciment sont également définies par les normes nationales ou régionales.

Matières organiques : Les matières organiques peuvent avoir un impact négatif sur la qualité du ciment en affectant la prise, le durcissement et la résistance. Les limites de matières organiques sont généralement spécifiées dans les normes techniques du ciment.

Impuretés minérales : Certaines impuretés minérales présentes dans les matières premières utilisées pour fabriquer le ciment peuvent influencer sa qualité. Par exemple, la présence de minéraux argileux peut affecter la prise et la résistance du ciment. Les spécifications du ciment peuvent inclure des limites sur ces impuretés minérales (Mounsif, 2018).

CHAPITRE IV : RESULTATS D'ANALYSE ET DISCUSSION

IV.1. Composition chimique des ciments analysés

Les résultats des analyses effectuées sur les échantillons sont repris dans le tableau 4. La composition chimique est un facteur déterminant pour la résistance des ciments aux agents agressifs.

Tableau 4: Compositions chimiques en pourcentage massique des différents types des ciments analysés par XRF

Compositions chimiques	DANGOTE 42.5R	BUCECO 32.5R	GLC 42.5N	Standard d'EAS 18 :2001 en %
CaO	**72.6**	**47.733**	62.167	60 – 67
SiO_2	**13.533**	20.3	18.533	18 – 25
Al_2O_3	3.303	6.68	5.88	3 – 8
Fe_2O_3	5.217	**17.833**	4.693	0.5 – 6
MgO	0.652	1.059	1.4	0.1 – 4
SO_3	**3.283**	**2.893**	1.87	1 – 3.5
K_2O	0.633	0.747	0.916	0.5 – 1
P_2O_5	0.121	0.178	**1.7**	0.5 – 1
MnO	0.085	0.245	1.127	
TiO_2	0.485	**1.633**	0.419	0.15-0.4
SrO	0.137	0.121	0.169	
Cl	0.009	0.048	0.009	< 1
ZrO_2	0.0428	0.0412	0.006	
Rh_2O_3	0.495	---	---	
Na_2O	---	0.42	0.981	<1
NiO	---	0.045	---	
CuO	---	---	0.024	
ZnO	---	---	0.073	
BaO	---	---	0.205	

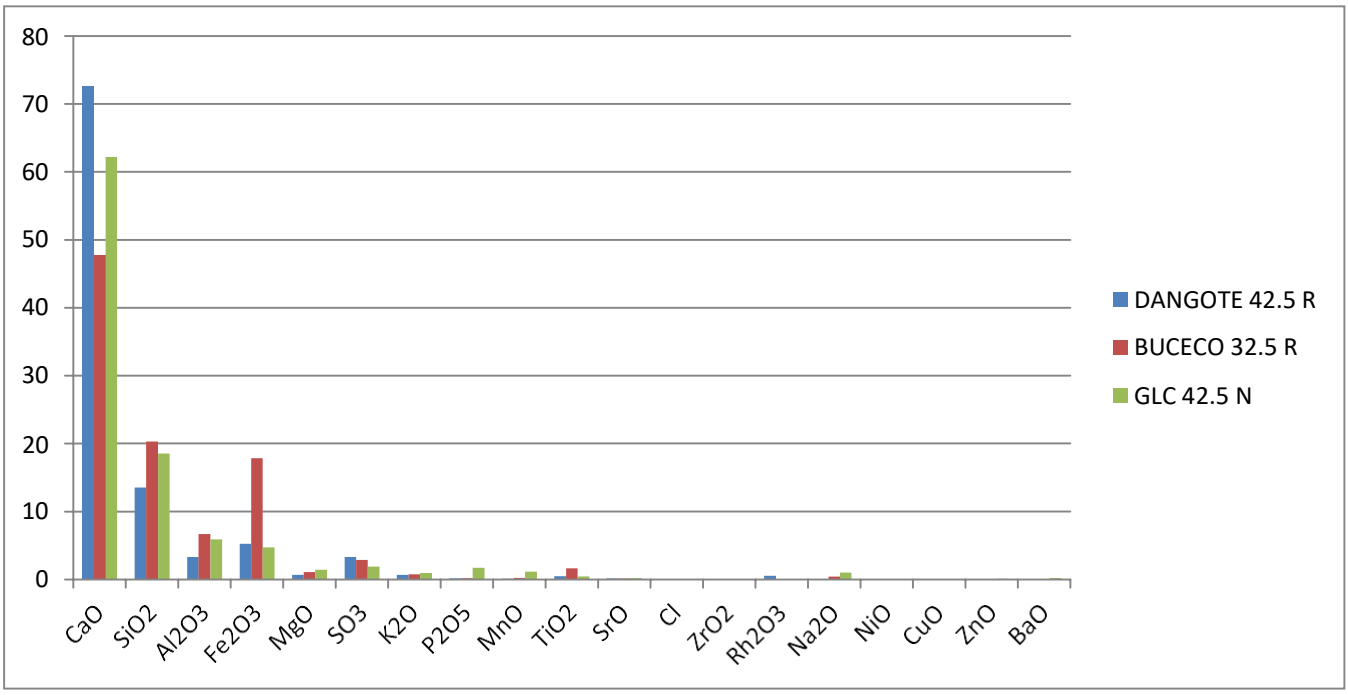


Figure 7: Résultats des analyses chimiques

Les compositions chimiques des ciments varient d'une usine à l'autre. La cause pourrait être due aux différences qui existent dans le dosage des matières premières dans les différentes usines.

Dans les ciments analysés, on a constaté que la teneur en CaO dans les trois échantillons étudiés est différente. Pour le ciment DANGOTE 42.5R la teneur en CaO est en dehors positivement par rapport aux limites spécifiées par la norme EAS 18 :2001. Dans l'échantillon BUCECO 32.5R la teneur en CaO est faible, elle se situe en dehors des limites inferieure spécifiées par la norme évoque. Pour le ciment GLC 42.5N la teneur en CaO se situent dans les limites spécifiée par la norme EAS 18 :2001 (Okumu et al., 2017).

On observe une teneur élevée en chaux (CaO) dans tous les échantillons par rapport aux autres oxydes car il est l'ingrédient principal du ciment qui constitue la base de la résistance mécanique du ciment durci(Ahmed et al., 2022).

La teneur en SiO_2 dans l'échantillon DANGOTE 42.5R est inférieure à la limite inférieure de la norme EAS 18 :2001.

Les ciments GLC 42.5N et BUCECO 32.5R ont une teneur en SiO_2 qui est dans la limite de la norme EAS 18 :2001. Le SiO_2 donne de la résistance au ciment grâce à la formation de silicate

dicalcique et tricalcique. De plus, le SiO_2 est un indicateur de finesse, détermine la capacité de broyage du clinker de ciment et confère de la résistance au clinker de ciment (Almabrok & Bin Khashin, 2019).

Comme le montre le tableau des résultats, la teneur en Al_2O_3 dans tous les échantillons analysés s'est avérée être dans la limite donnée par la norme.

Le ciment à haute teneur en alumine est utilisé lorsqu'un développement précoce de la résistance est nécessaire. Cependant, les ciments à haute teneur en alumine ne convient pas au bétonnage en masse. La teneur en Fe_2O_3 des échantillons DANGOTE 42.5R et GLC 42.5N se situait dans les limites stipulées par EAS 18 :2001. Pour l'échantillon BUCECO 32.5R, la teneur en Fe_2O_3 est supérieure à la limite supérieure de la norme.

Tous les échantillons de ciment analysés contiennent du MgO qui se situe dans les limites spécifiées dans la norme EAS 18 :2001. L'excès de magnésie réduira la résistance du ciment et peuvent nuire à la solidité du ciment, surtout à des âges tardifs (Almabrok & Bin Khashin, 2019).

La teneur en SO_3 pour tous les échantillons est situé dans la limite spécifiée par la norme EAS 18 :2001. Le SO_3 rend le ciment insalubre ou sain si présents respectivement en excès ou en très petites quantités (Almabrok & Bin Khashin, 2019).

Le clinker contient encore en faibles quantités, sous forme de solution solide ou pris dans des combinaisons complexes, des alcalis (Na_2O, K_2O), de la magnésie (MgO), et diverses traces de métaux. La teneur en alcalis et magnésie doit rester faible, car ces matières peuvent influencer défavorablement la stabilité du ciment durci (Lwiza, 2016).

La teneur en TiO_2 dans les échantillons DANGOTE 42.5R et GLC 42.5N se situe dans la limite de la norme mais pour l'échantillon BUCECO 32.5R, la teneur en TiO_2 se situe en dehors de la limite supérieure de la norme.

Le dioxyde de titane (TiO_2) est un excellent matériau photocatalytique qui confère des fonctionnalités biocides, autonettoyantes et anti smog lorsqu'il est ajouté à des matériaux à base de ciment. La présence de TiO_2 influence le processus d'hydratation du ciment et le développement de sa structure interne (Amor et al., 2022).

IV.2. Paramètres d'indice de la qualité

Les calculs des différents paramètres qui permettent de déterminer d'indice de la qualité des ciments analysés sont présentés dans le tableau 5.

Tableau 5: Paramètres d'indice de la qualité

Indice de la qualité	DANGOTE 42.5R	BUCECO 32.5R	GLC 42.5N	ASTMC150
I	**0.301**	**0.918**	0.458	0.4 - 0.5
MC	**160.698**	**62.257**	98.308	92 – 98
MS	**1.588**	**0.828**	1.753	1.8 - 3.4
MA	**0.633**	**0.375**	1.253	1 – 4

D'après les résultats du tableau 5, l'indice d'hydraulicité (i) est inférieur à 1 pour tous les échantillons analysés, c'est-à-dire les constituants acides sont inférieurs aux constituants basiques dans ces ciments.

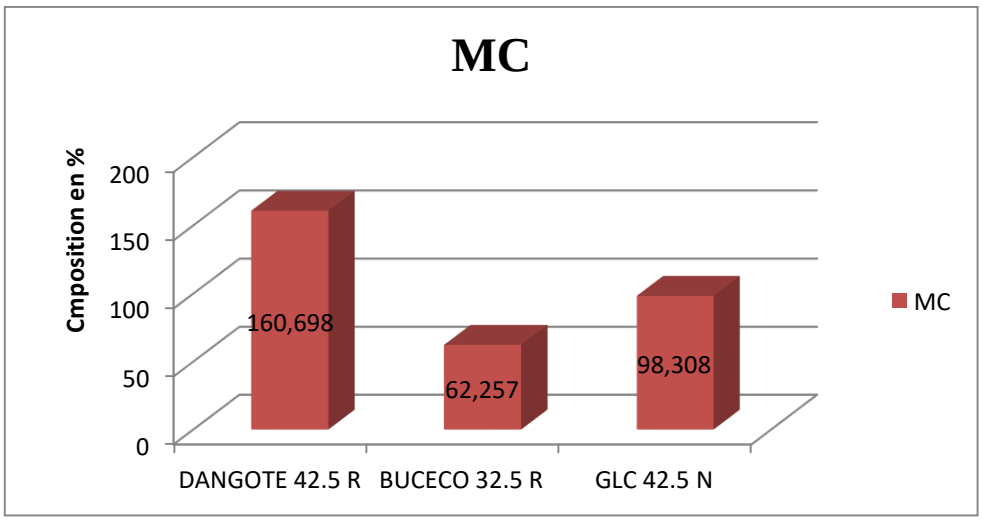


Figure 8: Représentation graphique de la MC.

Le tableau 5 montre que le ciment DANGOTE 42.5R a une teneur en module de chaux (MC) supérieure aux valeurs supérieures spécifiées par la norme ASTMC150. Pour les échantillons BUCECO 32.5R et GLC 42.5N les teneurs en module de chaux sont situées dans la limite normale.

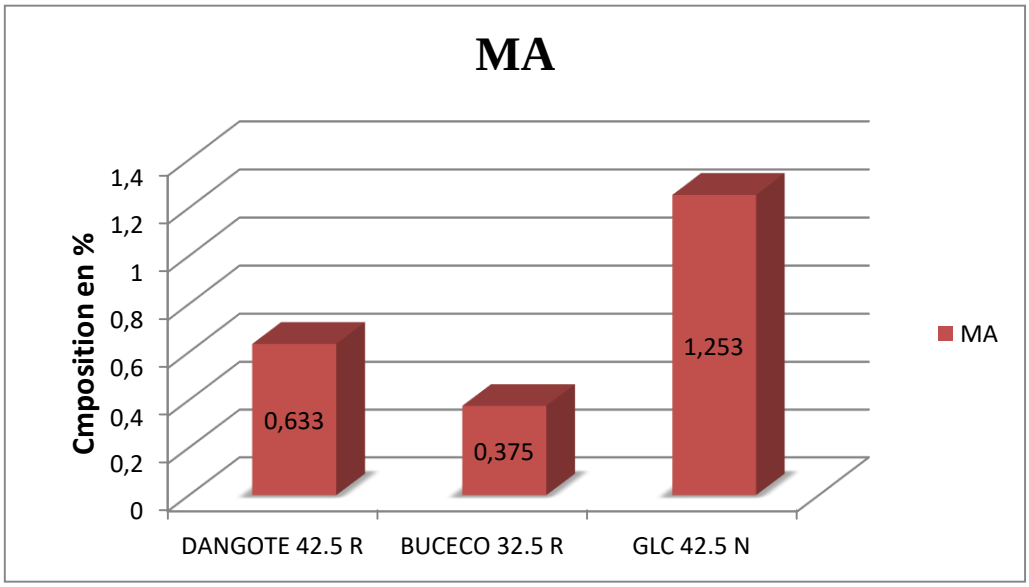


Figure 9: Représentation graphique de la MA.

Les deux échantillons de ciment BUCECO 32.5R et DANGOTE 42.5R ont une valeur en module d'alumine(MA) qui est inférieure à 0.638; donc ces ciments sont riches en oxyde de fer (Fe_2O_3).

Pour le ciment GLC 42.5N dont la valeur en module d'alumine est supérieure à 0.638, on dit que ce ciment est riche en Alumine (mélange normale).

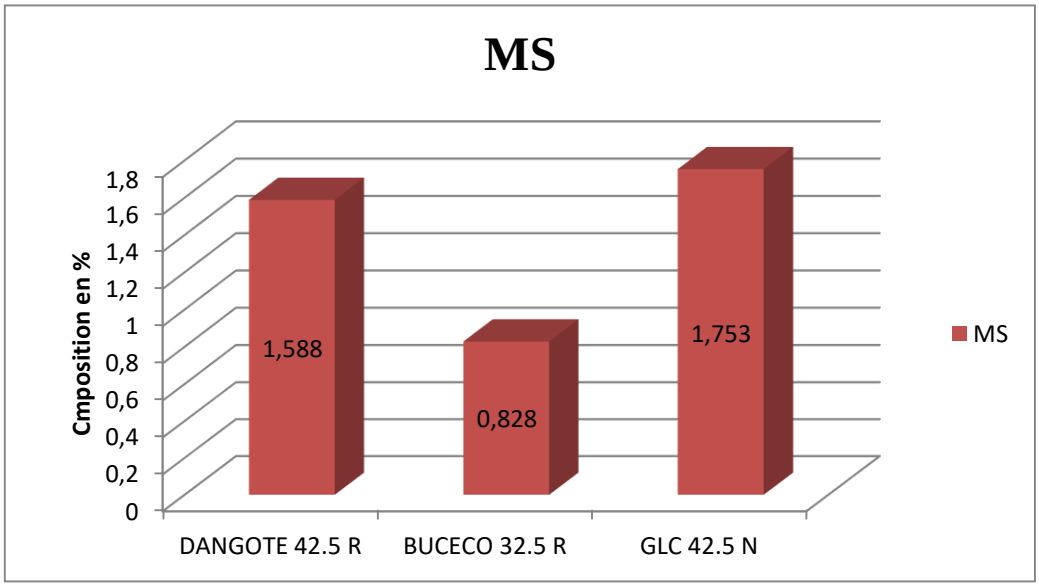


Figure 10: Représentation graphique de la MS.

Le module de silice a été calculé pour évaluer la composition chimique des matières premières utilisées dans la fabrication du ciment, en particulier les argiles et les minéraux argileux. Il permet de déterminer la proportion relative de silice et d'alumine dans ces matériaux. Pour les deux ciments DANGOTE 42.5R et GLC 42.5N les valeurs sont plus proche de la limite exigée par la norme ASTMC 150. Pour le ciment BUCECO 32.5R, la valeur en MS est plus faible par rapport à l'exigence de la norme. Cela signifie que la teneur en alumine est plus élevée, ce qui peut favoriser la résistance et la réactivité du ciment.

IV.3. Composition minérale des ciments analysés

Les résultats des calculs de la composition minéralogique qui se fait à partir des résultats de la composition chimique sont présentent dans le tableau 6.

Tableau 6: Composition minérale des ciments analysés

Echantillons	C_3S	C_2S	C_3A	C_5A_3	C_4AF	CaO_L
DANGOTE 42.5R	51.425	0	**-0.0638**	0	**15.853**	**27.422**
BUCECO 32.5R	0	**58.261**	**-42.742**	19.678	**54.212**	0
GLC 42.5N	65.767	**3.864**	7.65	0	**14.267**	0
ASTMC150	45 - 65	7- 32	8 – 12		10 - 11	< 2

Le tableau 6 montre les valeurs de la composition minérale des phases principales constituant les différents types des ciments analysés.

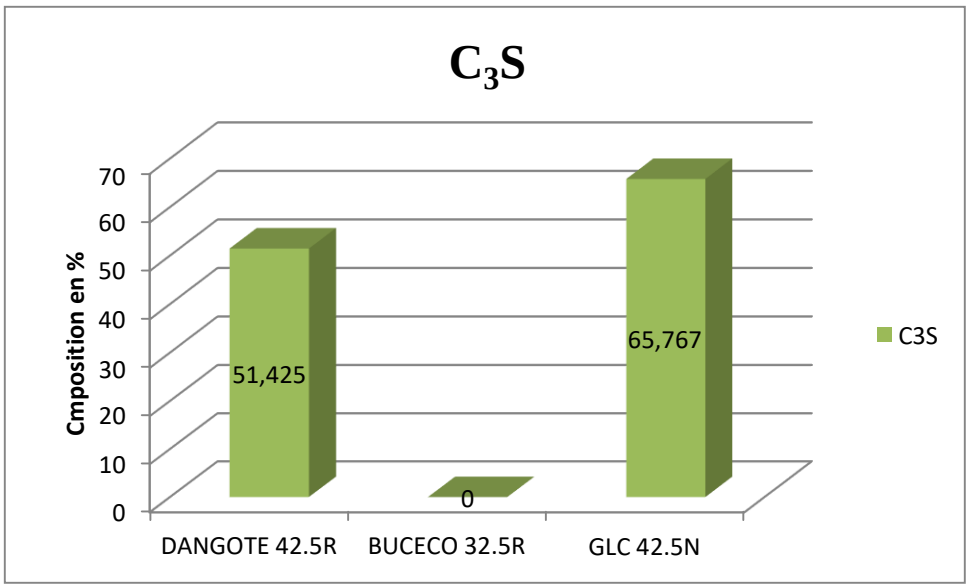


Figure 11: Présentation graphique de la composition en C_3S.

D'après les résultats du tableau 6, la teneur en C_3S de deux échantillons DANGOTE 42.5R et GLC 42.5N se situe dans les limites de la norme ASTMC150. Pour l'échantillon BUCECO 32.5R, la teneur en silicate tricalcique (C_3S) est nulle du fait que le module de chaux est présent en quantité insuffisante (inférieure à 90%) ce qui est empêché théoriquement, tout le C_2S de se transformer en C_3S car il n'y a pas de chaux libre dans le mélange durant le processus de clinkérisation. La teneur en grande quantité du (C_3S) provoque un durcissement rapide du ciment et est en grande partie responsable de la prise initiale et de la résistance initiale.

De plus, le ciment avec une proportion plus élevée de C_3S, comme c'est le cas pour la plupart des ciments actuels, il aura tendance à avoir une résistance initiale plus élevée et permettra un retrait précoce du coffrage ou une post-tension. D'un autre côté, le ciment avec un C_3S plus élevé entraînera des problèmes dus à la chaleur d'hydratation, en particulier lors du coulage en masse.

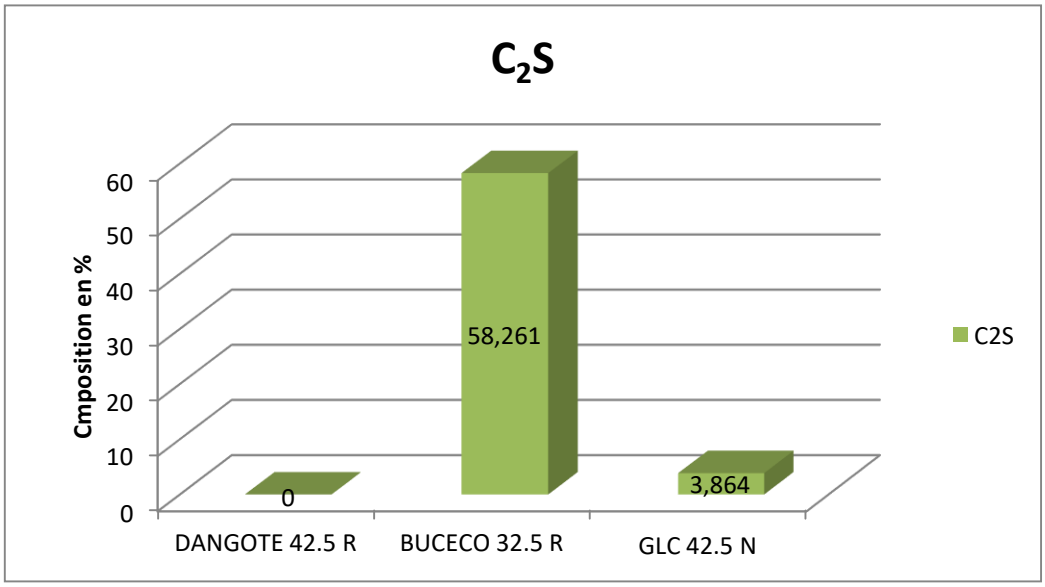


Figure 12: Présentation graphique de la composition en C_2S.

Pour C_2S, un échantillon GLC 42.5N est dans la limite mais l'échantillon BUCECO 32.5R est supérieur à la limite supérieure. Pour l'échantillon DANGOTE 42.5R la teneur en C_2S est nulle du fait que ce ciment contient le module de chaux en grange quantité (teneur supérieur à 100%). Cependant, en présence des chaux libres en grande concentration dans le mélange, il pourrait théoriquement valoriser la transformation totale de C_2S en C_3S.

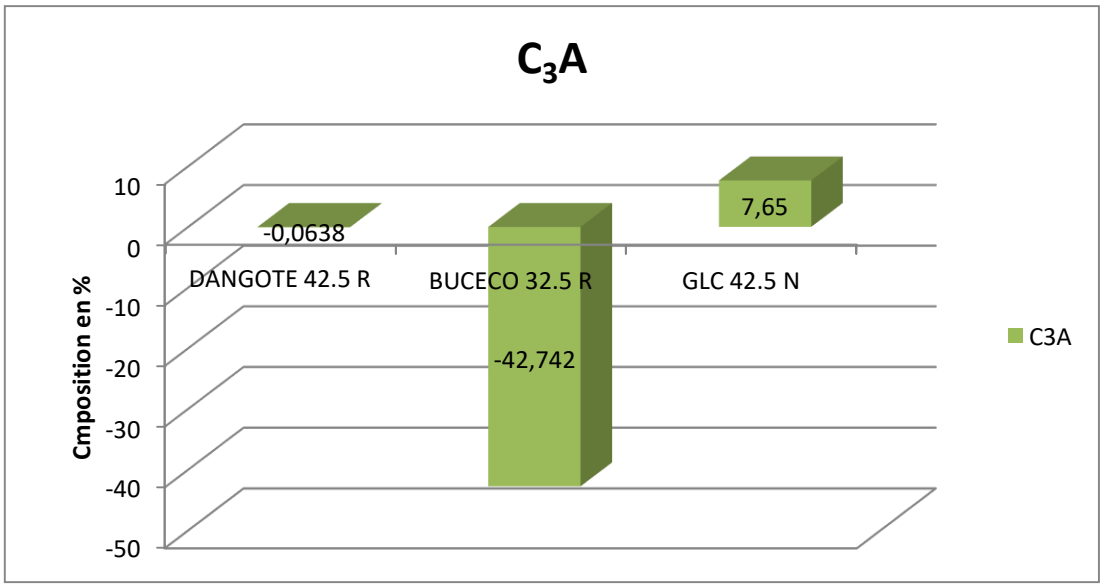


Figure 13: Présentation graphique de la composition en C_3A.

L'aluminate tricalcique (C_3A) libère une grande quantité de chaleur au cours des premiers jours de durcissement et, avec le C_3S et le C_2S, peut augmenter quelque peu la résistance initiale du ciment durcissant. L'alumine tricalcique C_3A provoque une prise rapide ou « prise instantanée » sans ajout de gypse pour ralentir le processus. Le C_3A s'hydrate très rapidement et influence les caractéristiques de liaisonnement précoce. Un faible pourcentage de ciment C_3A est plus résistant aux sulfates. Le ciment GLC 42.5N présente une teneur souhaitable en C_3A par la norme ASTMC150. Par contre les deux autres échantillons BUCECO 32.5R (-42.742) et DANGOTE 42.5R (-0.0638) sont en dehors négativement de la limite selon la norme spécifiée par ASTMC150. Comme le module d'alumine de ces deux ciments est inférieurs à 0.638, les ciments sont donc riches en fer et pauvre en alumine c'est pourquoi leurs composition en C_3A sont négatives.

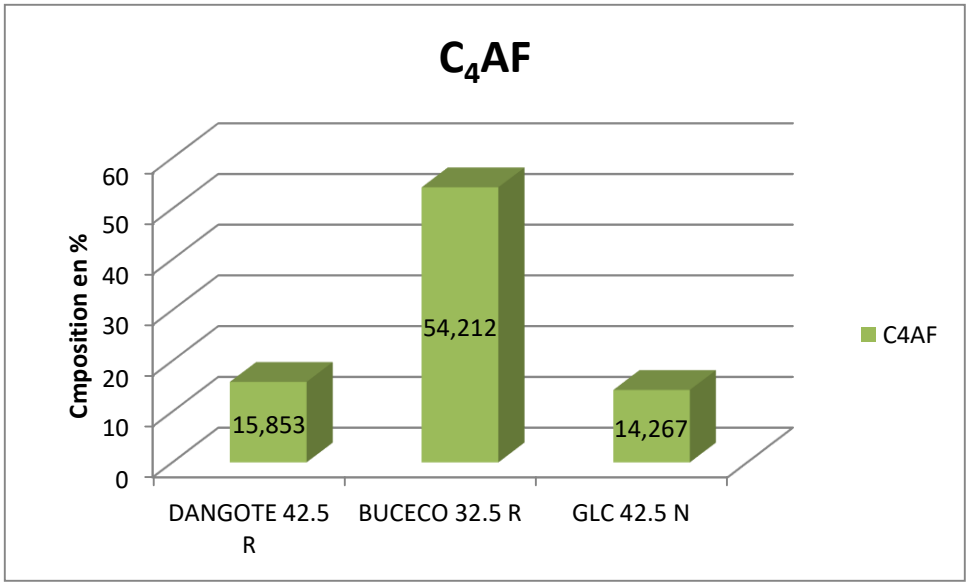


Figure 14: Présentation graphique de la composition en C_4AF.

L'aluminoferritetétracalcique (C_4AF) contribue très légèrement au gain de résistance et contribue aussi aux effets de couleur qui rendent le ciment gris.

Pour le composé C_4AF, tous les échantillons sont en dehors de la lime normative. Cependant un échantillon BUCECO 32.5R a extrêmement dépassé la limite spécifiée par ASTMC150 avec une teneur en C_4AF de 54.212 (Prince U & Munachiso C, 2022).

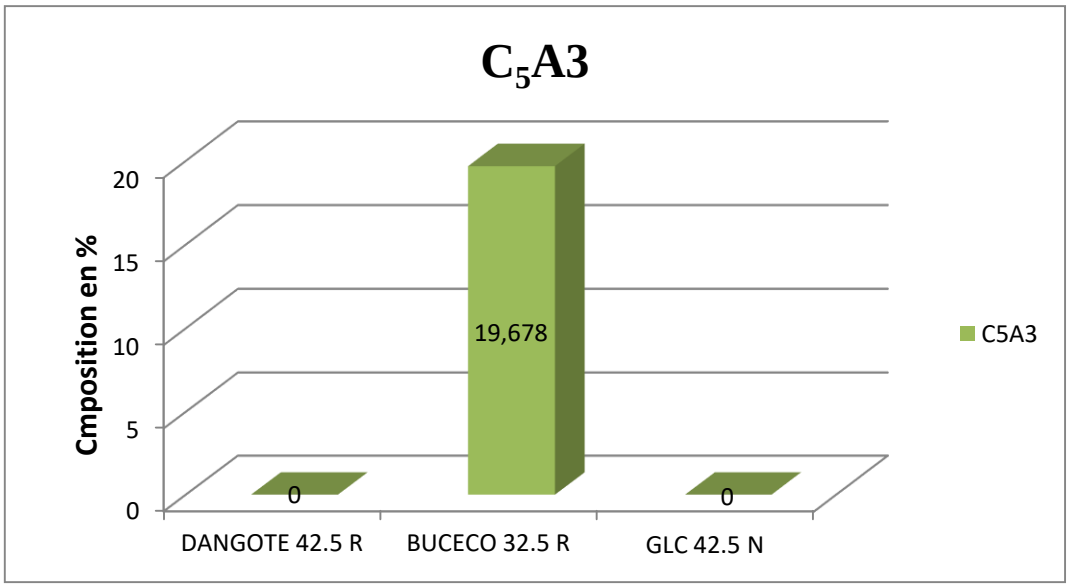


Figure 15: Présentation graphique de la composition en C_5A_3.

On a constaté ainsi la présence du composé C_5A_3 dans l'échantillon BUCECO 32.5R. La formation de ce composé se fait si le refroidissement des laitiers est lent, donc une partie sensible de laitier réussit à se cristalliser sous forme de minéraux stables tels que le C_5A_3 (Salem, 2017).

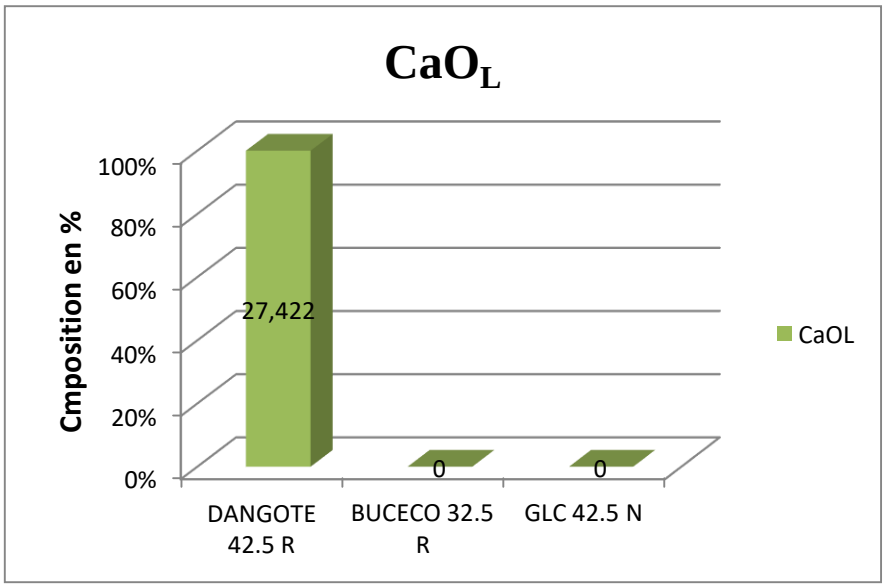


Figure 16: Présentation graphique de la composition en CaO_L.

Pour l'échantillon DANGOTE 42.5R il y a la présence de chaux libre en grande quantité (27.422%) dans le ciment. En raison que, le facteur de saturation en chaux est supérieur à 100 % (160.698%), il existe un déséquilibre entre les constituants. Toute la chaux ne peut être saturée et reste sous forme de chaux non combinée ou chaux libre. La chaux libre est un paramètre essentiel pour juger de la qualité et du degré de cuisson de la pâte. Des clinkers bien cuits résultant d'un cru bien dosé et de bonne granulométrie présentent des teneurs inférieures à 2 % (Fedrigo et al., 2020). L'augmentation de la teneur en chaux libre peut provenir d'un dérèglement du processus de cuisson ou d'un manquement dans la préparation du cru (Charles Stéphan, 2018).

CHAPITRE V : CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

V. 1. CONCLUSION

L'objectif de ce travail consistait à déterminer la composition chimique quantitative par spectroscopie de fluorescence à rayon X (XRF) des oxydes majeurs et autres constituants contenus dans les ciments de marque DANGOTE 42.5R, BUCECO 32.5R et GLC 42.5N, qui sont quelques-uns des ciments couramment utilisés au Burundi. Les résultats quantitatifs nous ont permis de calculer les paramètres d'indice de la qualité et la composition minérale pour chaque marque de ciment.

Les résultats d'analyse indiquent que chaque marque de ciment étudiée présente des variations individuelles en matière des compositions chimiques. Les échantillons DANGOTE 42.5R et BUCECO 32.5R ont montré que de nombreux oxydes se situent dans les limites spécifiées par la norme EAS 18: 2001 mais le SiO_2 pour le ciment DANGOTE 42.5R est en dehors de la limite inférieure de la norme. De plus, la composition en d'oxyde de calcium (CaO) dans ces ciments se situe en dehors de la norme.

Pour le ciment DANGOTE 42.5R, la teneur en d'oxyde de calcium (CaO) est supérieure à la valeur normative avec une teneur de 72.6%. La quantité en excès d'oxyde de calcium dans ce ciment peut avoir des conséquences indésirables sur les propriétés du matériau fini. Bien que l'oxyde de calcium soit un composant nécessaire dans la fabrication du ciment, en excès peut entraîner des problèmes (gonflement et fissuration, durcissement lent, faible résistance finale).

Pour le ciment BUCECO 32.5R, la teneur en CaO est inférieure à la valeur minimale de la norme de l'EAS 18 :2001 avec une teneur de 47.73%. L'oxyde de calcium, également appelé chaux vive, est un composant essentiel dans la fabrication du ciment, car il réagit chimiquement avec l'eau pour former des hydrates de calcium, qui confèrent au ciment sa résistance et sa dureté. La présence en quantité insuffisante d'oxyde de calcium dans ce ciment, peut avoir plusieurs conséquences négatives sur la qualité et les propriétés du matériau fini.

Quant au ciment GLC 42.5N initialement suspendu par l'autorité de normalisation, la comparaison de sa composition chimique avec la norme de référence indique que tous les oxydes se trouvent dans la limite normale.

Pour la composition minérale de chaque échantillon, c'est seulement le ciment GLC 42.5N qui présente toutes les quatre phases principales du ciment à savoir : C_3S-C_2S-C_3A-C_4AF.

Dans l'échantillon BUCECO 32.5R, il y a l'absence totale de la C_3S et la présence d'une teneur en C_3A négative. De même, pour l'échantillon DANGOTE 42.5R, il a été constaté que la phase C_2S n'est pas formée et présente aussi une quantité insuffisante en C_3A avec une valeur négative. Et comme il y a une grande quantité en module de chaux dans ce ciment, on a la présence des chaux libre de 27,42%.

V.2. RECOMMANDATIONS

En définitive, en l'absence d'études sur la résistance mécanique, il serait difficile de statuer sur le rejet de tel ou tel autre ciment au regard des seuls résultats d'analyse chimique. C'est pour cette raison que nous formulons les recommandations suivantes :

- L'autorité de normalisation devrait saisir les opportunités offertes par cette étude pour élaborer une norme de qualité sur le ciment spécifique ou adaptée aux conditions de construction propres au Burundi.
- Les autorités compétentes devraient informer les fabricants de s'assurer sur la qualité du ciment au cours du processus de fabrication. Ainsi, sensibiliser la population aux risques liés à l'utilisation du ciment n'ayant pas été certifié par l'autorité de normalisation.
- Les fabricants du ciment et les ingénieurs en génie civil devraient travailler ensemble pour s'assurer que les matériaux utilisés sont conformes aux spécifications des normes afin de garantir la sécurité et la durabilité des structures.
- En fin, tenant compte des problèmes que peuvent poser les ciments disponibles aux marchés Burundais qui ne répondent pas à la norme, cette étude mérite d'être approfondie par des études sur la résistance mécanique, la stabilité et la détermination du temps de prise normal.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Achraf, L., & Med nadire, C. (2018). *Béton de terre stabilisée (cas d'ouargla).Mémoire de Master*. *(Vol . 69)*.

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*(02), 113-126. https://doi.org/10.4236/jmmce.2022.102009

Aïtcin, P.-C. (2016). Portland cement. In *Science and Technology of Concrete Admixtures* (p. 51). Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100693-1.00003-5

Ali, M., Khan, I., & Hossain, M. (2008a). Chemical Analysis of Ordinary Portland Cement of Bangladesh. *Chemical Engineering Research Bulletin*, *12*(0), 7-10. https://doi.org/10.3329/cerb.v12i0.1491

Ali, M., Khan, I., & Hossain, M. (2008b). Chemical Analysis of Ordinary Portland Cement of Bangladesh. *Chemical Engineering Research Bulletin*, *12*(0), 7-10. https://doi.org/10.3329/cerb.v12i0.1491

Almabrok, M., & Bin Khashin, N. (2019). *Analysis of chemical composition of different Brands of Portland cement used in Libya. International Journal of Civil and Structural Engineering Research* (Vol. 7).

Amel, B. (2016). *Contribution à la caractérisation d'un ciment à base du laitier +5 % de calcaire. Mémoire de Master* (Vol. 104).

Amor, F., Baudys, M., Racova, Z., Scheinherrová, L., Ingrisova, L., & Hajek, P. (2022). Contribution of TiO2 and ZnO nanoparticles to the hydration of Portland cement and photocatalytic properties of High Performance Concrete. *Case Studies in Construction Materials*, *16*, e00965. https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e00965

Ayotunde Akanni, Oluyemisi, Osun State, Nigeria Awofadeju, Ayinde Samuel, Nigeria Adeyemo, & Bishir Goke. (2020). *Comparative Analysis of the Chemical Composition of Various Brands of Portland Cement Available in South-Western Parts of Nigeria*. https://doi.org/10.13140/RG.2.2.12142.23362

Ben Sahnoune, M. (2021). *Méthodes d'analyse et de contrôle de la qualité du ciment Cas : Groupe GICA. (W) de Chlef. Mémoire de Master* (Vol. 79).

Chaht fouzia, M. L. (2012). *Caractérisation des propriétés thermiques des liants hydrauliques au jeune âge : Ciment et pouzzolane. Mémoire de Master* (Vol. 110).

Charles Stéphan, A. (2018). *Contribution à la conception d'un ciment activé par des déchets : Valorisation des déchets d'andralanitra. Mémoire de Master* (Vol. 84).

Derouich, H. (2018). *Réactivité de deux variétés cristallines de la phase aluminate tricalcique C3A du ciment en présence ou non de superplastifiant. (Vol. 47)*. https://hal.univ-lorraine.fr/hal-01877916

Desaar, F. (2015). *Effets des additions de type II sur les écoulements multiphasiques dans les pâtes de ciment. Mémoire de Master* (Vol. 155).

Elbeyli, İ. Y., Derun, E. M., Gülen, J., & Pişkin, S. (2003). Thermal analysis of borogypsum and its effects on the physical properties of Portland cement. *Cement and Concrete Research*, *33*(11), 1729-1735. https://doi.org/10.1016/S0008-8846(03)00110-8

FDUS EAS 18-1. (2018). *East African Standard -Cement—Part 1 : Composition, specification and conformity criteria for common cements. Final Draft Uganda Standard* (Vol. 48).

Fedrigo, W., Núñez, W. P., & Visser, A. T. (2020). A review of full-depth reclamation of pavements with Portland cement : Brazil and abroad. *Construction and Building Materials*, *262*, 120540. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120540

Fouad, M. G. (2006). *Science des matériaux de construction. Mémoire de Master*. *(Vol. 58).*

Frideric, J. (2014). *Contribution à l'étude de la valorisation des poudres de granite ,déchets d'une carrière de la societte progranit en cimenterie. Thèse de Doctorat* (Vol. 120).

Gmira, A. (2003). *Etude texturale et thermodynamique d'hydrates modèles du ciment* (Vol. 217). Thèse de doctorat -l'Université d'Orléans

Govin, A. (2006). *Aspects physico-chimiques de l'interaction bois—Ciment. Modification de l'hydratation du ciment par le bois -Thèses en ligne*. https://theses.hal.science/tel-00012091/

Gueddour afef, B. (2013). *Synthése et caractérisation de silicates de calcium hydratés (C.S.H) hybride. Thèse de Doctorat* (Vol. 145).

Hajar, D. (2011). *Réactivité de deux variétés cristallines de la phase aluminate tricalcique C3A du ciment en présence ou non de superplastifiant. Mémoire de Master* (Vol. 47). https://hal.univ-lorraine.fr/hal-01877916

Hökfors, B., Boström, D., Viggh, E., & Backman, R. (2015). On the phase chemistry of Portland cement clinker. *Advances in Cement Research*, *27*(1), 50-60. https://doi.org/10.1680/adcr.13.00071

Inam, I., Nasiry, M. K., & Nasir, M. (2022). *Comparative Analysis of the Chemical Compositions of Afghani Ghori and Various Pakistani Cement Brands Used in Afghanistan*. *13*. https://www.researchgate.net/publication/360561349

Ir C. Ployaert. (2013). *Les ciments belges spécification et certification. Ouvrage—BENOR. 24*. Bld du souverain 68 – 1170 Bruxelles; FEBELCEM.Fédération de l'industrie cimentière belge.

Ludwig, H.-M., & Zhang, W. (2015). Research review of cement clinker chemistry. *Cement and Concrete Research*, *78*, 24-37. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.05.018

Lwiza, A. (2016). *Caractérisation d'un ciment à base de pouzzolane. Mémoire de Master* (Vol. 84).

Matschei, T., Lothenbach, B., & Glasser, F. P. (2007a). The AFm phase in Portland cement. *Cement and Concrete Research*, *37*(2), 118-130. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2006.10.010

Matschei, T., Lothenbach, B., & Glasser, F. P. (2007b). The role of calcium carbonate in cement hydration. *Cement and Concrete Research*, *37*(4), 551-558. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2006.10.013

Mohamed, Y. (2016). *Contribution à la valorisation d'un déchet de cimenterie (ciment hydraté) pour l'élaboration d'un nouveau ciment. Mémoire de Master* (Vol. 87).

Mounsif, D. (2018). *Comportement des bétons : Expérimentation et modélisation des paramètres technologiques influant les propriétés physico-chimiques, mécaniques et rhéologiques des bétons frais et durcis.Thèse de Doctorat*. *(Vol. 161).*

Nadjia, S. (2022). *Etude du control qualité et l'évaluation chimique du ciment lors de sa cuisson. Mémoire de Master*. (Vol.*60)*.

Nicolas, H. (2009). *Application de l'approche probabiliste à la durabilité des produits préfabriqués en béton* (Vol. 140). Thèse de doctorat -l'Université Toulouse III - Paul Sabatier

Okumu, V. A., Shitote, S. M., & Oyawa, W. O. (2017). Influence of Constituent Materials Properties on the Compressive Strength of in Situ Concrete in Kenya. *Open Journal of Civil Engineering*, *07*(01), 63-81. https://doi.org/10.4236/ojce.2017.71004

Oueslati, A., & Tiss, H. (2011). *Comparative study of the effects of two reducing agents of chrome (VI) in cement*. *7*. https://www.researchgate.net/publication/236268649

Prince U, N., & Munachiso C, O. (2022). *Analysis on Chemical Composition of Different Brands of Cement in Nigeria with Their Corresponding Setting Time*. *(Vol. 7).*

Punmathari, T., Rachakornk, M., Imyim, A., & Wecharatan, M. (2010). Co-processing of Grinding Sludge as Alternative Raw Material in Portland Cement Clinker Production. *Journal of Applied Sciences*, *10*(15), 1525-1535. https://doi.org/10.3923/jas.2010.1525.1535

Salem, A. (2017). *Effet de l'activation mécanique de l'argile cuite (déchets de briques) sur le comportement mécanique du mortier. Thèse de Doctorat* (Vol. 145).

Sana, H. (2020). *Caractérisation physico-chimique du ciment de la cimenterie d'ech chlef. Mémoire de Master*. *(Vol. 65)*.

Sánchez Berriel, S., Favier, A., Rosa Domínguez, E., Sánchez Machado, I. R., Heierli, U., Scrivener, K., Martirena Hernández, F., & Habert, G. (2016). Assessing the environmental and economic potential of Limestone Calcined Clay Cement in Cuba. *Journal of Cleaner Production*, *124*, 361-369. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.02.125

Sawadogo, A. Y. F. (2021). *Biodétérioration des ciments Portland et sulfoalumineux dans les réseaux d'assainissement urbains. Thèse de Doctorat*. *(Vol. 236)*. https://hal.univ-lorraine.fr/tel-03418738

Schneider, M., Romer, M., Tschudin, M., & Bolio, H. (2011). Sustainable cement production—Present and future. *Cement and Concrete Research*, *41*(7), 642-650. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.03.019

Skempton, A. W. (2016). *Portland Cements, 1843-1887* (Vol. 38). http://dx.doi.org/10.1179/tns.1962.008

Stutzman, P., Heckert, A., Tebbe, A., & Leigh, S. (2014). Uncertainty in Bogue-calculated phase composition of hydraulic cements. *Cement and Concrete Research*, *9*, 40-48. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2014.03.007

Taylor, H. F. W. (1989). Modification of the Bogue calculation. *Advances in Cement Research*, *2*(6), 73-77. https://doi.org/10.1680/adcr.1989.2.6.73

Thibaudon, M., Monnier, S., & Galán, C. (2019). Pollen et spores fongiques : Une norme européenne. *Revue Française d'Allergologie*, *59*(8), 625-626. https://doi.org/10.1016/j.reval.2019.08.004

Thirion-Merle, V. (2014). Spectrométrie de fluorescence X. In P. Dillmann & L. Bellot-Gurlet (Éds.), *Circulation et provenance des matériaux dans les sociétés anciennes* (p. 291-298). Editions des archives contemporaines. https://doi.org/10.17184/eac.4103

Thomas, A., & Kankam, C. K. (2022). Comparative Study of the Compressive Strength of Concrete made from Different Brands of Cements in Ghana. *Journal of Engineering Research and Reports*, 41-49. https://doi.org/10.9734/jerr/2022/v23i9747

Trauchessec, R. (2013). *Mélanges de ciments sulfoalumineux et Portland* (Vol. 264). Thèse de doctorat : Université de Lorraine

Vignes, J. L., Moranville, M., & Bournazel, J.-P. (1996). *Une vie de ciment : Expériences de chimie sur la mise en œuvre et les propriétés d'un matériau. (Vol. 90).*