

**RÉPUBLIQUE DÉMOCRATIQUE DU CONGO**  
**UNIVERSITÉ LIBRE DES PAYS DES GRANDS LACS**

**« U.L.P.G.L/GOMA »**

**FACULTÉ DES SCIENCES ET DES TECHNOLOGIES  
APPLIQUÉES**

**DÉPARTEMENT DE GÉNIE CIVIL**



**BP. 368 GOMA**

[www.ulpgl.net](http://www.ulpgl.net)

---

**ÉTUDE D'UN BÉTON RÉFRACTAIRE  
SERVANT À LA RÉPARATION DES  
CHAUSSÉES DE LA VILLE DE GOMA**

---

**Par : NSHOMBO KOKO Audifax**

Travail de fin de cycle présenté en vue de  
l'obtention du Diplôme de Gradué en Sciences et  
Technologies Appliquées

**Option : Structures et Ouvrages d'Arts**

**Directeur : Drs. Ing Chérif BISHWEKA**

**Encadreur : Ass. Ing. MUHIWA Grace MASIKA**

**ANNÉE ACADEMIQUE 2020–2021**

## ÉPIGRAPHE

*« Les esprits libres sont réfractaires à toute catégorisation. Il y voit une limitation à la réflexion. La seule chose à laquelle ils tiennent est la liberté de penser. »*

*Mohamed Fillali*

## IN MEMORIUM

En mémoire de tous ceux qui ont perdu la vie lors de la pandémie du coronavirus (COVID-19), je dédie ce travail à leur mémoire. Leur départ prématuré a laissé un vide immense dans nos vies et dans le monde académique.

Leur absence est profondément ressentie et leurs contributions potentielles à la société ont été tragiquement interrompues. À travers ce travail, je souhaite rendre hommage à ces personnes qui ont été emportées par cette maladie dévastatrice.

Leur mémoire est une puissante motivation pour poursuivre mes recherches avec détermination et engagement. Je m'engage à utiliser mes compétences et mes connaissances pour contribuer à la prévention et à la lutte contre les futures crises sanitaires.

En intégrant cet in memoriam dans mon travail, je souhaite rappeler l'importance de l'humanité, de la solidarité et de la compassion dans nos travaux académiques. La recherche et l'innovation doivent être inspirées par le désir de servir la société et de faire une différence positive.

En honorant leur mémoire, je m'engage à faire preuve de responsabilité, d'éthique et de rigueur scientifique dans mes travaux futurs. Je continuerai à chercher des solutions pour relever les défis auxquels notre société est confrontée, en gardant toujours à l'esprit les vies qui ont été tragiquement perdues.

Puissent les âmes de ceux qui ont succombé au COVID-19 trouver la paix éternelle. Que leur souvenir nous rappelle l'urgence de travailler ensemble pour prévenir de telles tragédies à l'avenir.

Dans cet in memoriam, je rends hommage à leur courage, à leur force et à leur résilience. Que leur héritage nous inspire à poursuivre nos travaux avec passion, détermination et un profond sens de responsabilité envers la société.

À travers ce travail, je souhaite faire ma part pour honorer leur mémoire et contribuer à un avenir où les leçons tirées de cette pandémie sont utilisées pour créer un monde plus fort, plus préparé et plus humain.

Que leur sacrifice ne soit jamais oublié, et que leur mémoire reste vivante dans nos esprits et nos travaux académiques.

## DÉDICACES

À mon cher honorable père, le Professeur Nshombo Muderhwa Venant, à ma tendre mère, Shamavu Bahati Liliane, à mes frères et sœurs bien-aimés, à tous ceux qui ont cru en moi et qui continuent de me soutenir, et à tous ceux qui ont contribué à notre formation d'ingénieur,

Je dédie humblement ce travail à vous tous. Votre amour, votre soutien et votre confiance indéfectible ont été les fondements de ma réussite. Votre encouragement constant et votre croyance en mes capacités m'ont donné la force et la détermination nécessaires pour surmonter les obstacles et atteindre mes objectifs.

Papa, tu es un modèle d'excellence académique et de persévérance. Tes connaissances approfondies, ton dévouement à l'apprentissage et ton soutien inconditionnel ont été une source d'inspiration pour moi. Je suis honoré de suivre tes pas et de continuer à faire honneur à ton héritage.

Maman, ta tendresse, ton amour inconditionnel et ton soutien inébranlable ont été mes plus grands atouts. Ta force et ton encouragement ont été une source de motivation inépuisable. Je te suis profondément reconnaissant pour tout ce que tu as fait et continues de faire pour moi.

À mes frères et sœurs, vous êtes mes compagnons de vie et mes meilleurs amis. Votre soutien, vos encouragements et votre affection m'ont donné la confiance nécessaire pour poursuivre mes rêves. Notre lien familial est un véritable trésor qui m'inspire chaque jour.

À tous ceux qui ont cru en moi et qui continuent de m'encourager, je vous suis reconnaissant pour votre confiance et votre soutien indéfectibles. Vos paroles d'encouragement et votre foi en moi ont été des moteurs puissants qui m'ont poussé à donner le meilleur de moi-même.

Et enfin, à tous ceux qui soutiennent notre formation d'ingénieur, je vous adresse ma profonde gratitude. Votre soutien financier, moral et logistique a été essentiel pour nous permettre de poursuivre nos études et d'atteindre nos objectifs académiques. Nous vous en sommes éternellement reconnaissants.

Que ce travail reflète notre gratitude envers vous tous. Nous nous engageons à travailler avec détermination, à évoluer en tant qu'ingénieurs et à apporter une contribution positive à la société. Votre soutien et votre confiance sont des cadeaux inestimables que nous chérissons. Avec amour, gratitude et respect, nous dédions ce et cette réussite à vous tous.

## REMERCIEMENTS

Nous souhaitons exprimer nos sincères remerciements à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail. Votre soutien, vos conseils et vos encouragements ont été d'une valeur inestimable, et nous sommes profondément reconnaissants pour votre précieuse contribution.

Tout d'abord, nous tenons à exprimer notre gratitude envers le Seigneur Tout-Puissant, dont la grâce et la guidance nous ont permis d'accomplir cette étape importante de nos études.

Un remerciement particulier va au Doctorant Ingénieur BISHWEKA Chérif pour sa direction éclairée et son soutien tout au long de ce projet. Nous sommes reconnaissants envers l'Assistante Ingénieur MUHIWA Grace MASIKA pour son encadrement précieux et son assistance durant la rédaction de ce travail.

Nous voulons également exprimer notre reconnaissance envers le corps académique et scientifique de l'ULPGL, en particulier de la FSTA, pour leur enseignement de qualité et leur contribution à notre formation.

Nos remerciements vont également à nos parents, NSHOMBO MUDERHWA Venant et SHAMAVU BAHATI Liliane, pour leur soutien indéfectible, tant sur le plan matériel que moral. Vos sacrifices et votre amour nous ont permis d'atteindre cette étape importante, et nous vous en sommes profondément reconnaissants.

Nous souhaitons également adresser nos remerciements à nos frères, sœurs et autres membres de notre famille pour leur soutien constant et leurs encouragements tout au long de ce parcours.

À nos amis et camarades de classe, nous vous exprimons notre gratitude pour les échanges fructueux, les discussions stimulantes et le partage d'idées qui ont enrichi notre travail.

Nous tenons à remercier l'Assistant Ingénieur GABRIEL KASHALA Djibril pour sa suggestion précieuse de sujet et ses conseils avisés tout au long de notre projet.

Enfin, nous tenons à remercier toutes les personnes qui ont contribué de différentes manières, qu'il s'agisse de membres du personnel, d'amis, de collègues ou d'autres personnes qui ont apporté leur soutien et leur expertise.

Nous vous sommes profondément reconnaissants pour votre engagement et votre générosité. Votre contribution a été essentielle à la réalisation de ce travail, et nous vous en sommes infiniment reconnaissants.

Que Dieu vous bénisse tous et vous comble de bonheur et de succès dans vos propres entreprises.

## RÉSUMÉ

Le présent travail, intitulé "Étude d'un béton réfractaire servant à la réparation des chaussées de la ville de Goma", vise à examiner les aspects théoriques et les considérations de conception d'un béton réfractaire adapté aux conditions spécifiques de la ville de Goma, en République démocratique du Congo.

La ville de Goma est confrontée à des défis majeurs liés à l'état de ses chaussées, notamment les températures élevées, les variations thermiques fréquentes et la présence de matériaux volcaniques. Ces facteurs contribuent à la détérioration rapide des chaussées, nécessitant une réparation et une maintenance adéquates pour assurer la sécurité et la durabilité des infrastructures routières.

L'objectif principal de cette étude est donc de formuler un béton réfractaire spécifiquement adapté aux conditions de Goma, en prenant en compte les caractéristiques des matériaux locaux et les contraintes environnementales uniques. Pour atteindre cet objectif, une revue approfondie des travaux antérieurs sur les bétons réfractaires est réalisée, afin de comprendre les principes de base, les propriétés et les méthodes de formulation.

Le travail de recherche se divise en plusieurs chapitres. Le chapitre I, intitulé "Généralités sur les bétons réfractaires", fournit une introduction détaillée aux caractéristiques générales des bétons réfractaires, en mettant l'accent sur leurs composants principaux et les considérations de conception spécifiques.

Le chapitre II, intitulé "Méthodologie et présentation de l'obtention du béton réfractaire ainsi que les différents essais effectués sur les bétons réfractaires", présente la méthodologie utilisée pour formuler le béton réfractaire adapté à Goma. Il s'appuie sur les connaissances théoriques acquises dans le chapitre précédent pour proposer une formulation spécifique répondant aux besoins de la réparation des chaussées de la ville.

Enfin, le chapitre III, intitulé "Conclusion générale", résume les principaux résultats et conclusions de l'étude théorique. Il met en évidence l'importance de l'utilisation d'un béton réfractaire adapté pour la réparation des chaussées de Goma, en tenant compte des conditions spécifiques de la région. Des recommandations pratiques sont formulées pour l'utilisation future du béton réfractaire dans les projets de voirie à Goma, soulignant la nécessité d'approfondir les recherches dans ce domaine pour améliorer la durabilité et la résistance des chaussées.

En résumé, ce travail de recherche propose une étude théorique approfondie sur le développement d'un béton réfractaire adapté à la réparation des chaussées de Goma. En mettant l'accent sur les aspects théoriques et les considérations de conception, cette étude vise à fournir des informations précieuses pour l'amélioration des infrastructures routières de la ville, en proposant des solutions adaptées aux conditions spécifiques de Goma.

## ABSTRACT

This research, titled "Study of Refractory Concrete for the Repair of Roads in the City of Goma," aims to examine the theoretical aspects and design considerations of refractory concrete tailored to the specific conditions of Goma, in the Democratic Republic of Congo.

The city of Goma faces significant challenges regarding the condition of its roads, including high temperatures, frequent thermal variations, and the presence of volcanic materials. These factors contribute to rapid deterioration of the roads, necessitating proper repair and maintenance to ensure the safety and durability of the road infrastructure.

The primary objective of this study is to formulate refractory concrete specifically tailored to the conditions of Goma, taking into account the characteristics of local materials and unique environmental constraints. To achieve this objective, a thorough review of previous research on refractory concrete is conducted, to understand the fundamental principles, properties, and formulation methods.

The research is divided into several chapters. Chapter I, titled "Overview of Refractory Concrete," provides a detailed introduction to the general characteristics of refractory concrete, with a focus on its main components and specific design considerations.

Chapter II, titled "Methodology and Presentation of Obtaining Refractory Concrete and Various Tests Conducted on Refractory Concrete," presents the methodology used to formulate refractory concrete tailored to Goma. Building upon the theoretical knowledge gained in the previous chapter, it proposes a specific formulation that meets the requirements for road repair in the city.

Finally, Chapter III, titled "General Conclusion," summarizes the main findings and conclusions of the theoretical study. It highlights the importance of using refractory concrete tailored for the repair of Goma's roads, taking into account the specific conditions of the region. Practical recommendations are provided for the future use of refractory concrete in road projects in Goma, emphasizing the need for further research in this field to enhance the durability and strength of the roads.

In summary, this research offers an in-depth theoretical study on the development of refractory concrete for the repair of roads in Goma. By focusing on theoretical aspects and

## ÉTUDE D'UN BETON RÉFRACTAIRE SERVANT A LA RÉPARATION DES CHAUSSÉES DE LA VILLE DE GOMA

design considerations, this study provides valuable insights for improving the city's road infrastructure by proposing solutions that are tailored to the specific conditions of Goma.

## Table des matières

ÉPIGRAPHE.....	i
IN MEMORIUM.....	ii
DÉDICACES .....	iii
REMERCIEMENTS .....	iv
RÉSUMÉ.....	v
ABSTRACT .....	vi
TABLE DES MATIÈRES .....	viii
SIGLES ET ABBREVIATIONS .....	ix
LISTE DES TABLEAUX.....	x
LISTE DES FIGURES .....	xi
INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	1
CHAPITRE I : GÉNÉRALITÉS SUR LES BÉTONS RÉFRACTAIRES .....	8
CHAPITRE II : MÉTHODOLOGIE ET PRÉSENTATION DE L'OBTENTION DU BÉTON RÉFRACTAIRE AINSI QUE LES DIFFÉRENTS ESSAIS EFFECTUÉS SUR LES BÉTONS RÉFRACTAIRES .....	46
II.1.MÉTHODOLOGIE.....	46
II.1.1.MÉTHODOLOGIE APPLIQUÉE À L'OBTENTION DU BÉTON RÉFRACTAIRE .....	46
CHAPITRE III : CONCLUSION GÉNÉRALE .....	58
BIBLIOGRAPHIE .....	59

## SIGLES ET ABBREVIATIONS

### ➤ Sigles

REGIDESO	: Régie de distribution d'eau
AFNOR	: Association française de normalisation
BE	: Béton Réfractaire
BTC	: Les bétons dits à base teneur en ciment
UBTC	: Les bétons dits ultra-basse teneur en ciment
E/C	: Rapport eau/ciment
BHP	: Béton hautes à performances
BUHP	: Béton à ultra-hautes performances
EC2	: Eurocode 2
DEF	: Réseau international indépendant d'entreprises expertes en sécurités incendie
ESC	: European Seismological Commission
OVDG	: Office des voiries et Drainage Goma
ORG	: Office des Routes Goma
Ass	: Assistant
RDC	: République Démocratique du Congo
FSTA	: Faculté des sciences et des technologies appliquées
ULPGL	: Université Libre des Pays des Grands Lacs

### ➤ Abréviations

Kg/m <sup>3</sup>	: Kilogramme par mètre cube
°C	: Degré Celsius
%	: Pourcent
±	: Plus ou moins

## LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 1.RÉACTIVITÉ AVEC L'EAU DES DIFFÉRENTES PHASES D'ALUMINATE DE CALCIUM, D'APRÈS [17].....	18
TABLEAU 2.RISQUE DE FISSURATION EN FONCTION DU TYPE DE RETRAIT [31].....	27

## **LISTE DES FIGURES**

Figure 1. Cône pyroscopique étalonné incliné en demi-cercle [8].....	10
Figure 2. Principaux domaines d'utilisation des produits réfractaires et consommation annuelle en de l'ouest en 2002 [10]. .....	12
Figure 3. Diagramme ternaire CaO-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -SiO <sub>2</sub> [3].....	17
Figure 4. Les quatre figures représentant les causes des diverses formes de ségrégation [31] 21	
Figure 5. Le mauvais positionnement du joint à provoquer la fissure [31]. .....	23
Figure 6. Fissure dans une construction supposée étanche [31].....	24
Figure 7. Étape de bétonnage d'un mur de soutènement a) et c) solutions défavorables, b) et d) solutions favorables [31]. .....	25
Figure 8. Brèches de clavages coulés ultérieurement lors de la réalisation d'une dalle [31]. ..	25
Figure 9. Réseau orthogonal de fissures de tassement (vue globale et détail) [31] .....	28
Figure 10. Fissures de retrait plastique, dues à l'absence ou la mise en œuvre trop tardive de cure [31]. .....	30
Figure 11. Maîtrise des effets du retrait par fractionnement [31]. .....	32
Figure 12. L'absence de joints dans les glissières de sécurité provoque des fissures régulières dues au retrait de dessiccation [31]. .....	32
Figure 13. Diagramme des contraintes suite à une différence de température de 15-25°C entre la face externe et le cœur du béton [31] .....	35
Figure 14. Efflorescence sur un élément en béton (vue global et détail) [31] .....	37
Figure 15. Efflorescences sur un mur en béton soumis à la pluie après décoffrage [31].....	38
Figure 16. Efflorescences sur blocs bétons soumis à une alternance sec-humide [31].....	38
Figure 17. Dégradation d'éprouvettes de béton soumis à un test de résistance aux sulfates [31] .....	41
Figure 18. Pile massive d'un point atteint de réaction sulfatique interne. Le béton a subi une température de 80 °C durant plus de 200 heures [31]. .....	43
Figure 19. Exemple de bétons soumis à une attaque acide où le premier béton est tenue correct, le second béton est mauvaise tenue-Granulats siliceux et le troisième béton est mauvaise tenue-Granulats calcaires [31]. .....	45

## INTRODUCTION GÉNÉRALE

### 1. CONTEXTE :

En raison des exigences de leur métier, les ingénieurs doivent accorder une attention particulière à la construction, aux matériaux utilisés et au site d'implantation afin de garantir la stabilité et la durabilité des ouvrages. Malheureusement, certaines constructions de la ville de Goma sont souvent réalisées sans études préalables, ce qui entraîne des problèmes de surdimensionnement ou de sous-dimensionnement. Ces erreurs peuvent engendrer des dépenses inutiles, ainsi que des conséquences graves en termes de vies humaines et économiques.

Dans ce contexte, il est essentiel que les constructeurs veillent à l'économie, à la résistance et à la qualité des bétons utilisés, tout en garantissant la protection des vies humaines et en évitant la corruption, la détérioration ou la dégradation des chaussées. Les bétons, en général, et les bétons réfractaires, en particulier, jouent un rôle important dans les revêtements routiers, autoroutiers et les aménagements urbains.

Les chaussées en béton utilisent efficacement les ressources naturelles tout au long de leur cycle de vie. Elles contribuent à améliorer les conditions de déplacement, offrant ainsi des avantages en termes de mobilité, de sécurité et de confort pour l'ensemble de la société. De plus, grâce à leur faible besoin d'entretien, elles sont économiques. Les principales caractéristiques des chaussées en béton sont leur longue durée de vie et leur entretien minimal lorsqu'elles sont correctement conçues et mises en œuvre. Le choix des matériaux dépend des propriétés physiques, chimiques et mécaniques recherchées, telles que l'isolation, la conductivité et la résistance aux chocs mécaniques [1].

L'utilisation de bétons réfractaires pour la réparation des chaussées de la ville de Goma revêt une importance capitale en termes de durabilité. Les bétons réfractaires sont capables de supporter des températures extrêmement élevées, allant jusqu'à 1800°C. Leur utilisation permettrait ainsi d'obtenir une résistance solide face aux contraintes physiques, chimiques et naturelles, notamment les températures élevées. C'est pourquoi ils sont couramment utilisés dans des environnements industriels pour la construction de fours et de cheminées.

En résumé, l'utilisation de bétons réfractaires pour la réparation des chaussées de la ville de Goma présente des avantages considérables en termes de durabilité et de résistance aux températures élevées. Ces matériaux offrent une solution fiable pour assurer la longévité des chaussées dans la ville, tout en s'appuyant sur leur utilisation éprouvée dans des contextes industriels similaires [2].

## **2. PROBLEMATIQUE DU TRAVAIL :**

Nos rues subissent de graves dommages au fil du temps, principalement en raison du trafic intense des véhicules lourds et des variations de température. Ces facteurs sont les principales causes de dégradation des chaussées, en particulier pendant la saison des pluies, où il est fréquent de voir apparaître des nids-de-poule. Ces trous dans la chaussée sont causés par les écarts de température, les conditions climatiques défavorables et l'activité des véhicules, et ils peuvent causer d'importants dommages aux automobilistes.

## **3. PRÉSENTATION DES TRAVAUX PASSÉS QUI ONT TRAITÉ SUR LES BÉTONS RÉFRACTAIRE :**

- **THUMMEN**, Cette étude, réalisée par Frédéric THUMMEN et présentée à l'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon le 14 mai 2004, visait à examiner les propriétés mécaniques et la durée de vie des bétons réfractaires. L'objectif principal de cette recherche était de mieux comprendre le comportement mécanique de ces bétons et leur processus d'endommagement, ainsi que de développer des techniques permettant de prédire leur détérioration.

L'auteur a démontré que la rupture par fatigue des bétons réfractaires est attribuable à un mécanisme de propagation spécifique qui nécessite une étude approfondie. De manière générale, les résultats de cette étude ont confirmé que les bétons réfractaires sont résistants et peuvent avoir une durée de vie minimale de 10 ans [3].

- **SAOUDI SOUHILA**, Ce mémoire de master 2 en Génie Civil, option Ingénierie des Matériaux de Construction, pour l'année universitaire 2015/2016, aborde le sujet de l'élaboration et de la caractérisation d'un béton réfractaire fibré à base de déchets réfractaires. L'objectif de ce travail était de valoriser les déchets provenant de l'industrie des matériaux de construction, tels que les briques réfractaires de cimenterie et les rouleaux des faïenceries, qui sont actuellement sous-exploités.

La valorisation visée consistait à élaborer des bétons réfractaires en utilisant des granulats issus de déchets de briques réfractaires, ainsi qu'un liant classifié comme réfractaire. De plus, l'auteur souhaitait introduire des fibres de verre et de métal dans ces bétons, afin de les comparer à un béton témoin. L'ajout de fibres avait pour objectif d'améliorer les résistances en flexion des bétons réfractaires. Ainsi, le travail

Avait un double enjeu : valoriser les déchets et rechercher le renforcement des bétons à l'aide de fibres pour améliorer leurs caractéristiques techniques.

L'auteur démontre dans ce document que, d'après les résultats des essais de compression réalisés sur des éprouvettes de dimensions 4x4x4 cm<sup>3</sup>, la résistance à la compression des bétons réfractaires à base de granulats recyclés diminue en présence de fumée de silice. [4].

- **Mademoiselle SOLTANI HADJER**, Ce mémoire, présenté en juin 2018 dans le domaine des sciences et techniques, filière Métallurgie, spécialité Métallurgie, porte sur l'étude du problème d'usure des briques réfractaires MgO-C. L'objectif de ce travail était d'analyser les phénomènes de dégradation des céramiques réfractaires qui sont soumises à des conditions extrêmes, caractérisées par de hautes températures et des contraintes chimiques (corrosion) et mécaniques.

Les résultats de cette étude ont conduit à la conclusion que la durée de vie des poches à acier est réduite en raison des phénomènes d'usure et de corrosion des revêtements réfractaires. Les céramiques réfractaires travaillant dans ces conditions sévères subissent une expansion thermique importante, ce qui les expose à des agressions chimiques et mécaniques.

- **Mahdi GHASSEMI KARKROUDI**, Ce document, présenté et soutenu le 27 juin 2007 pour l'obtention du grade de Docteur de l'Université de Limoges dans la discipline/spécialité des Matériaux Céramiques et Traitement de Surface, traite du comportement thermomécanique en traction des bétons réfractaires, en se concentrant sur l'influence de la nature des agrégats et de l'historique thermique.

L'objectif principal de cette recherche était de développer, dans un premier temps, un dispositif expérimental de traction à haute température, puis, dans un deuxième temps, de mettre en œuvre cette approche expérimentale pour caractériser les lois de comportement mécanique de deux types de bétons réfractaires.

En général, les résultats de cette étude soulignent l'importance d'une caractérisation préalable par des techniques ultrasonores à haute température afin de mieux appréhender les conditions d'essai (température d'essai à considérer, cycles thermiques préalables), pour mener à bien des essais mécaniques significatifs, notamment en traction. Cette approche permet d'améliorer l'efficacité et la précision des analyses dans l'étude du comportement des bétons réfractaires [5].

- **Brice COLLIGNON**, Ce travail de doctorat, soutenu publiquement le 1er octobre 2009 devant le jury, porte sur le séchage des bétons réfractaires, avec une expérimentation, une modélisation et l'influence d'un ajout de fibre polymère. L'objectif principal était d'étudier et de caractériser un béton réfractaire à base de carbure de silicium, avec une taille maximale d'agrégats de 800  $\mu\text{m}$ , dans un environnement de type propulsion hybride.

Le col de la tuyère devait résister à un environnement fortement oxydant, généré par la combustion de polyéthylène solide et de protoxyde d'azote fluide, avec des températures de gaz inertes pouvant atteindre 2800 K. L'étude était divisée en trois parties : une caractérisation thermomécanique du matériau jusqu'à 1500 K, une étude sur son comportement d'oxydation dans une atmosphère standard, sous un flux solaire extrême de 15 MW/m<sup>2</sup>, et des tests sur banc avec un moteur hybride à l'ONERA, utilisant des tuyères conçues et réalisées au sein du laboratoire de recherche ICA.

#### ➤ **4. METHODOLOGIE**

La méthodologie adoptée pour la réalisation de cette étude repose sur une recherche documentaire comprenant l'utilisation de sources techniques disponibles sur Internet, dans les bibliothèques, ainsi que l'utilisation des cours suivis tout au long de notre premier cycle. Notre curiosité scientifique nous a également poussé à mener des entretiens avec des personnes plus expérimentées, à effectuer des visites sur le terrain et à effectuer un stage à l'Office des routes. Ce stage nous a permis d'approfondir nos connaissances sur les problèmes liés aux routes, la dégradation des chaussées et les matériaux utilisés pour leur réparation, tels que les bétons. Cette approche nous aidera à consulter la littérature disponible afin de mieux traiter notre sujet de recherche.

#### **5. OBJECTIF DU TRAVAIL**

L'objectif de cette étude consistera à examiner hypothétiquement l'utilisation du béton réfractaire, en discutant de son utilité, de son importance et de ses performances dans des zones où les chaussées sont soumises à des activités physiques ou mécaniques intenses (chocs, séismes, tremblements de terre, trafic routier...), des facteurs chimiques (proximité de lave volcanique ou températures exceptionnellement élevées) et des facteurs biologiques (maladies de la route telles que les nids-de-poule, dégradation par des eaux stagnantes...). Dans de telles conditions, il ne suffira pas d'utiliser n'importe quel type de béton. Ce travail

mettra également en évidence les problèmes ou les lacunes liés à l'utilisation du béton réfractaire en termes de coûts élevés par rapport aux bétons conventionnels (normaux) utilisés dans les chaussées de la ville de Goma et dans la plupart des pays du monde.

### **6. INTERET DU TRAVAIL [1] :**

Le béton réfractaire est un matériau plus efficace pour résister aux activités inépuisables (physiques, chimiques ou naturelles) susceptibles de dégrader le béton, notamment en cas de chaleur intense ou d'exposition au feu. Dans de telles situations, le béton ordinaire ne peut pas supporter des températures exceptionnellement élevées ni des contraintes physiques, chimiques et naturelles importantes.

Cependant, étant donné que l'homme est imparfait, il est difficile de trouver un matériau parfait qui puisse résister à toutes sortes de contraintes sans aucune faille. C'est là que le béton réfractaire intervient peut-être.

Notre travail présente plusieurs intérêts :

- Sur le plan personnel, l'étude de ce type de matériau (béton réfractaire) est un domaine complexe en raison du manque d'informations disponibles et de la rareté des études sur son comportement mécanique. Cette recherche nous permettra d'approfondir nos connaissances dans ce domaine, de comprendre sa formulation, ses caractéristiques, ses domaines d'utilisation ainsi que les différents tests réalisés sur ce type de béton.
- Sur le plan scientifique, le béton réfractaire est utilisé dans le domaine de la construction pour fabriquer des revêtements homogènes pour des fours ou des cheminées. Cependant, il est souvent mal évalué et peu utilisé de manière univoque dans notre parcours académique. Les matériaux utilisés dans les revêtements de chaussées doivent avoir de bonnes caractéristiques, tant du point de vue esthétique, en influençant l'embellissement et l'orientation, notamment pour les personnes malvoyantes, que du point de vue de la sécurité. La rugosité du revêtement permet d'éviter les problèmes de glissement, en particulier par temps de pluie. Les revêtements en béton pour les cyclistes réduisent les risques de chute, de glissement et sécurisent les déviations brusques dues à la traversée d'enfants ou à l'ouverture de portières. Ils doivent être en accord avec les évolutions architecturales des revêtements de chaussées en béton dans la vie moderne.

- Sur le plan socio-sécuritaire, les revêtements en béton, notamment dans le contexte du béton réfractaire, sont essentiels pour assurer la sécurité en permettant une adhérence optimale des véhicules, même dans des conditions climatiques difficiles comme la pluie. L'absence de nids-de-poule est également fondamentale en termes de sécurité pour les usagers.
- Sur le plan du confort et du bruit, les chaussées en béton actuelles permettent d'obtenir une surface régulière qui répond aux attentes des usagers. De plus, grâce à des techniques de traitement chimique, le bruit de roulement est considérablement réduit, se rapprochant de celui des revêtements hydrocarbonés. Les anciennes chaussées en béton offrent une durabilité qui assure une conduite confortable aux usagers.
- En termes de rapidité de mise en service, il n'est pas nécessaire d'attendre 28 jours pour la solidification complète du béton avant de rétablir la circulation. Lorsque le béton a atteint 70% de sa résistance finale, la chaussée peut être ouverte à la circulation, ce qui permet des délais plus courts par rapport aux bétons traditionnels de prise normale.
- En termes de durabilité, l'un des avantages majeurs des chaussées en béton est leur longue durée de vie et leur faible besoin d'entretien, à condition qu'elles soient correctement planifiées et mises en œuvre. Les revêtements en béton résistent notamment aux effets du gel/dégel.
- Sur le plan économique, le coût des chaussées en béton est une donnée relative. Il faut prendre en compte à la fois les coûts de construction initiaux et les coûts d'entretien sur la durée de vie du revêtement. De plus, les contraintes budgétaires des pouvoirs publics pour l'entretien des routes sont importantes. Un revêtement en béton à faible coût d'entretien, avec des prix de matériau compétitifs, peut offrir une solution économique à long terme.

En conclusion, l'utilisation du béton réfractaire présente de nombreux avantages, notamment en termes de résistance à la chaleur, de durabilité, de sécurité et de confort. Cependant, il est important de prendre en compte les spécificités de chaque projet et de bien évaluer les coûts et les bénéfices avant de décider d'utiliser du béton réfractaire. La recherche continue dans ce domaine permettra d'améliorer nos connaissances et d'optimiser l'utilisation de ce matériau dans différents contextes.

## **7. SUBDIVISION DU TRAVAIL:**

Outre cette introduction générale, ce travail sera abordé en trois chapitres distincts :

Chapitre 1 : Généralités sur le béton réfractaire

Ce premier chapitre fournira une vue d'ensemble du béton réfractaire. Nous y aborderons ses principales caractéristiques, ses propriétés thermiques, mécaniques et chimiques, ainsi que ses domaines d'application. Nous discuterons également des différents types de béton réfractaire disponibles sur le marché et de leurs compositions.

Chapitre 2 : Méthodologie et essais du béton réfractaire

Le deuxième chapitre sera consacré à la méthodologie utilisée pour obtenir du béton réfractaire. Nous présenterons les différentes étapes de fabrication, y compris le choix des matériaux, le mélange, la mise en forme et le durcissement. Nous détaillerons également les différents essais réalisés pour évaluer les caractéristiques et les performances du béton réfractaire, tels que les essais de résistance à la chaleur, de résistance mécanique et d'absorption d'eau.

Chapitre 3 : Conclusion générale

Le troisième chapitre constituera une conclusion générale de notre travail. Nous récapitulerons les principaux résultats et conclusions obtenus à partir de nos recherches sur le béton réfractaire. Nous discuterons également des perspectives d'avenir et des éventuelles améliorations qui pourraient être apportées à ce matériau. Enfin, nous soulignerons l'importance du béton réfractaire dans divers secteurs et son potentiel pour répondre aux besoins de la construction moderne.

En suivant cette structure, nous espérons fournir une approche claire et organisée pour étudier le béton réfractaire et en comprendre les aspects fondamentaux, sa méthodologie de fabrication et ses propriétés.

## CHAPITRE I : GÉNÉRALITÉS SUR LES BÉTONS RÉFRACTAIRES

### I.1.Définition [3]

On appelle béton une pierre artificielle obtenue grâce au durcissement d'un mélange de liant, d'eau et des granulats choisis de façon rationnelle. C'est l'un des matériaux importants utilisés dans tout le domaine de la construction. Ceci s'explique par le fait qu'il présente une grande possibilité de modification ou de variations de propriétés grâce à certains traitements physico-chimiques, une grande facilité de traitement mécanique ainsi qu'un coût moindre, 80 à 90% de ses constituants sont d'origine locale. Une bonne connaissance de ses propriétés permet donc de l'utiliser pour mettre sur pieds des ouvrages solides, durables et économiques. En tant que matériau de construction, il fait partie du cadre de notre vie par sa résistance, son isolation thermique et acoustique, son aptitude au vieillissement ainsi que la diversité qu'il permet dans les formes et les couleurs. Il répond pleinement aux normes architecturales, permet de franchir de grandes portées et s'est taillé une bonne place même dans le domaine des voiries.

Le béton est donc un mélange de plusieurs composants : ciment, eau, air, granulats et souvent, adjuvants qui doivent constituer un ensemble homogène. Le ciment lui sert de liant qui sert à enrober les particules des granulats et aussi remplir les vides, l'eau sert à l'hydratation du ciment afin que ce dernier passe de l'état d'une poudre sèche à une pâte, le rôle secondaire de l'eau est de lubrifier les particules pour qu'elles puissent se glisser les unes aux autres,

Quant aux granulats, on se base sur leurs propriétés caractéristiques importantes qui sont la propreté et la granulométrie.

Finalement, pour ce qui est des adjuvants, ils sont de plus en plus utilisés. Ils modifient les propriétés des bétons et des mortiers auxquels ils sont ajoutés.

Exemple : Ce qui peut servir de modèle l'emploi des plastifiants-réducteurs d'eau et des supers plastifiants facilite la mise en place du béton dans les pièces minces fortement armées, ainsi que la réalisation des bétons de hautes performances.

#### I.1.1.Matériau réfractaire:

Le terme "réfractaire" trouve son origine en français et a été recensé pour la première fois en 1539 par Robert Estienne dans son dictionnaire latino-gallicum. Étymologiquement, il provient du latin ecclésiastique "refractarius", qui signifie "querelleur" ou "indocile". La racine latine est dérivée du verbe "refrigère", qui a deux sens principaux. Le premier sens est

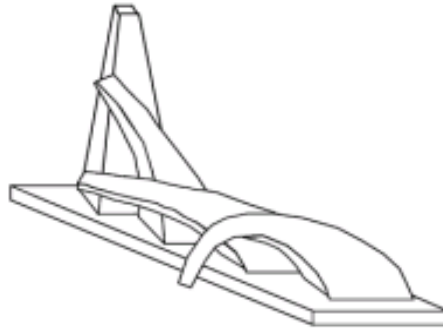
"briser" ou "abattre une cloison", tandis que le deuxième sens est déjà lié à la déviation des rayons lumineux lorsqu'ils pénètrent dans l'eau ou une substance vitreuse.[4] [5].

Dans le domaine de la métallurgie, le terme "réfractaire" est utilisé pour désigner les aciers ou alliages qui sont capables de résister à des températures élevées, ainsi qu'à la corrosion dans différents environnements et aux contraintes mécaniques. Thermiquement, ce terme est utilisé pour décrire les matériaux qui peuvent résister à la chaleur et qui conservent leurs propriétés même à des températures extrêmement élevées [6].

Dans d'autres références, au niveau étymologique le terme réfractaire vient du latin refractarius, réfrigéré, qui veut dire briser, résisté, refuser d'obéir ou de se soumettre [7]; en particulier un matériau réfractaire est un matériau qui « refuse de se soumettre » à haute température. À un niveau plus scientifique, un matériau réfractaire est une substance ou mélange de substances qui a une température de fusion supérieur à 1500°C [8], ou encore une autre matière autre que les métaux et les alliages, dont la résistance pyroscopique est équivalent à 1500°C au minimum [7], ce qui en d'autres termes veut dire que le matériau ne doit ni se ramollir, ni s'affaisser sous son propre poids avant d'atteindre 1500°C.

Selon la norme B40-001 de novembre 1966(AFNOR) définit aussi les réfractaires comme un produit, quelle que soit sa nature (métal, céramique, carbone,...) est dit réfractaire lorsqu'il possède une résistance pyroscopique supérieur à 1500°C (1520°C) et 1580°C selon la norme industrielle japonaise [8]. Il est dit hautement réfractaire lorsque sa résistance pyroscopique de passe le 1800°C.

La détermination pyroscopique ou la réfratarité se mesure en portant à température croissante, des éprouvettes du matériau considéré et des cônes pyroscopiques étalons. La vitesse de montée en température, les formats, les conditions d'atmosphère, sont définis dans la norme. Les cônes, ou montres étalons (**cf.Fig1**), sont constitués des matériaux céramiques connus, ayant un comportement de ramollissement similaire à celui des produits testés. La résistance pyroscopique du matériau testé correspond à la température où le cône étalon est tombé (incliné en demi-cercle) ou se situe entre deux cônes définis en composition pour tomber à des températures déterminées.



**Figure 1. Cône pyroscopique étalonné incliné en demi-cercle [8]**

### **I.1.2. Béton réfractaire :**

Les bétons réfractaires sont donc des bétons de ciment pouvant résister à des températures très élevée allant jusqu'à des températures environnant 1800°C au lieu de 300°C pour un béton normal. Ils appartiennent à la famille des matériaux réfractaires [9].

### **I.2. Utilité [6]:**

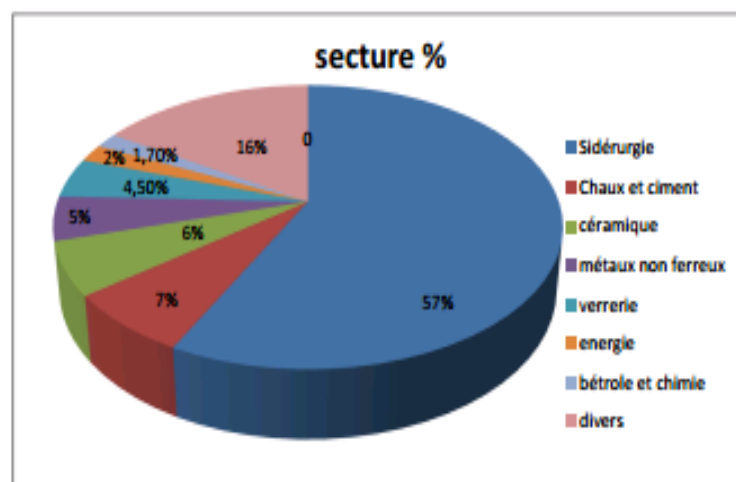
Les bétons réfractaires, tout comme les autres matériaux réfractaires, sont des matériaux structurels consommables conçus pour fonctionner à haute température dans des environnements sévères. Ils sont utilisés pour résister à la corrosion causée par des métaux fondus dans l'industrie sidérurgique ou par des atmosphères agressives et chlorées dans les incinérateurs.

Sans ces matériaux largement répandus, notre vie quotidienne serait sans aucun doute beaucoup moins agréable. En effet, nous ne pourrions pas disposer d'acier, de fonte, d'alliages métalliques, de verre, de céramiques, de ciment ou de procédés de craquage du pétrole à un prix abordable. L'amélioration des performances des matériaux réfractaires a un impact significatif sur la productivité des industries qui les utilisent, en réduisant les pertes thermiques. Elle contribue également à la sécurité du personnel et à la protection de l'environnement, car les matériaux réfractaires consommés sont difficilement recyclables. Le coût de la consommation de matériaux réfractaires est très élevé. Par exemple, ils représentent plus de dix pourcent des coûts de transformation d'une aciérie. Ainsi, le recyclage et la valorisation des déchets réfractaires sont aujourd'hui considérés comme une solution d'avenir pour répondre à la demande croissante et protéger l'environnement.

### **I.3. Les domaines d'utilisation des matériaux réfractaires :**

Le béton réfractaire comme les autres matériaux réfractaires sont des produits qui conservent leurs caractéristiques physico-chimiques sous hautes températures, leurs fusions n'apparaissent qu'au-delà de condition d'emploi. Ils sont essentiellement utilisés dans les « industries du feu »: fonderie, fabrication des métaux non-ferreux, du ciment, du verre et de céramiques. Ils sont également présents dans des domaines comme la pétrochimie, la chimie, l'industrie de l'incinération des déchets et production d'énergie [10], l'importance stratégique de ces matériaux est considérable, ils répondent à une réelle demande de quatre secteurs économiques importants, ils sont utilisés dans plusieurs domaines entre autres :

- Les secteurs traditionnels des hautes températures, tels que la métallurgie, la sidérurgie, l'industrie du verre, de la céramique et des matières premières qui visent en permanence une amélioration de leurs procédés d'élaboration et de leur rendement énergétique.
- L'environnement et plus particulièrement le domaine de traitements et la valorisation énergétique des déchets (incinération).
- La pétrochimie et le secteur émergent des biocarburants de 2ème génération par la voie thermochimique.
- L'énergie : les nouvelles filières de production d'énergie, de chaleur et d'électricité, telles que la production d'hydrogène ou les nouvelles générations des centrales nucléaires (EPR, génération IV) nécessitent la conception de revêtements réfractaires adaptés [5].
- Pour les navettes spatiales : exemple la protection thermique des navettes, qui doivent résister à des températures supérieures à +1650°C, lorsqu'elles seront en orbite, ainsi que les matériaux utiliser au grand froid de l'espace avec variation de température -121° jusqu'à +167°C.



**Figure 2. Principaux domaines d'utilisation des produits réfractaires et consommation annuelle en de l'ouest en 2002 [10].**

#### **I.4. Les propriétés des bétons réfractaires [2] [6]:**

Les bétons réfractaires se caractérisent par les éléments suivants :

- Résistance à la chaleur : Ils présentent une grande stabilité aux températures élevées, généralement entre 1500°C et 1600°C.
- Résistance à la corrosion : Ils offrent une excellente résistance à la corrosion, protégeant ainsi les structures contre les attaques chimiques.
- Isolation thermique : Ils possèdent des propriétés isolantes qui contribuent à limiter les pertes de chaleur.
- Résistance mécanique : Ils présentent une bonne résistance mécanique à la fois à froid, à haute température et aux impacts mécaniques tels que les chocs, les tensions et les tractions.
- Compacité : Les bétons réfractaires affichent une très faible porosité, généralement inférieure à 3% et souvent autour de 1%, ce qui les rend très denses.
- Capacité d'accumulation de chaleur : Ils ont la capacité de stocker la chaleur, ce qui peut être bénéfique dans certaines applications.
- Malléabilité : Ils peuvent être façonnés et modelés selon les besoins, offrant ainsi une certaine flexibilité dans leur utilisation.

- Finition de surface : Ils permettent d'obtenir des surfaces lisses et sans défauts, ce qui est important dans des applications telles que les dalles de fours de cuisson.
- Résistance à la fissuration : Ils sont conçus pour résister à la fissuration, ce qui garantit leur durabilité et leur longévité.
- Grande dureté : Les bétons réfractaires sont caractérisés par leur forte résistance à l'usure et à l'abrasion.

Il est important de noter que les matériaux réfractaires sont généralement préparés à partir d'oxydes, ce qui leur confère une grande stabilité face à l'oxydation et une forte inertie chimique.

### **I.5.Catégories des bétons réfractaires [6] :**

Les bétons réfractaires denses peuvent être divisés en trois catégories dont la différence essentielle est la teneur massique en ciment :

- Bétons classiques : teneur en ciment entre 15 et 25 %
- Bétons basse teneur en ciment : 4 et 10 %
- Bétons à ultra basse teneur en ciment : < à 2 %

La nature du liant permet de distinguer deux principales familles de bétons réfractaires :

- **Les bétons à liants chimiques** : c'est le cas des bétons constitués d'un liant à base de phosphore, utilisés pour de bonnes résistances mécaniques à haute température surtout dans le cas de produits d'alumine pure, ou des bétons constitués d'un liant à base de chrome.
- **Les bétons à liants hydrauliques** : soit à base de ciment alumineux, de type ciment fondu (teneur en  $Al_2O_3$  comprise entre 40 % massique et 42 % massique), soit à base de ciment réfractaire alumineux (teneur en  $Al_2O_3$  supérieure à 60 % massique) qui, après cuisson, se comportent comme un matériau réfractaire façonné cuit [10].

Les bétons peuvent être considérés comme des matériaux composites composés d'une matrice cimentaire et d'agrégats de tailles différentes pouvant aller jusqu'à plusieurs mm la taille maximale est de 7 mm [3]. Dans le cas des bétons de génie civil, la résistance mécanique est

assurée par les liaisons hydrates du ciment. Pour les réfractaires la liaison hydrate ne sert qu'à la mise en forme avant cuisson, la résistance mécanique finale étant assurée par les liaisons céramiques créées après cuisson à haute température  $> 900^{\circ}\text{C}$  [6]. Cette liaison céramique « iono-covalentes » très fortes qui favorisent une réfractarité élevée, leur confèrent une grande dureté, une absence de ductilité avec une faible ténacité (aux basses températures).

### **I.6. Types des bétons réfractaires [2] :**

On distingue deux grandes familles de béton réfractaires telles que les bétons réfractaires denses et les bétons réfractaires isolants.

- **Les bétons réfractaires denses :** les bétons réfractaires sont denses quand leur densité est égale ou supérieure à  $1750\text{kg/m}^3$ . Ces bétons réfractaires s'utilisent dans les fourneaux, les blocs de brûleur, les fours à moufle et les chaudronneries.

Exemple : four de fusion, four de cimenterie.

La résistance à l'abrasion, au choc thermique et à l'agressivité thermique des scories est déterminée par le choix des matériaux.

La conductivité thermique étant liée à la densité, les bétons réfractaires denses sont conducteurs et donc très peu isolants.

- **Les bétons réfractaires isolants :** les bétons réfractaires isolants ont des densités, après cuisson, de  $1500\text{Kg/m}^3$  ou moins. Ils sont prioritairement utilisés pour la construction d'enceintes ou de fours ne présentant pas de risques mécaniques majeurs. Ils s'utilisent aussi sur les surfaces exposées aux températures élevées ainsi que comme couche supplémentaire de revêtement derrière les briques et les bétons réfractaires de haute densité. Leur rôle est de limiter les déperditions thermiques.

Exemple : four de traitement thermique, de céramique.

**N.B:** Les bétons réfractaires isolants sont couramment utilisés pour la réalisation de pièces de forme modulée.

### **I.7. Les constituants du béton réfractaire [2] :**

Le béton réfractaire, comme les bétons ordinaires (béton de ciment normal) est fabriqué ou composé en mélangeant principalement du ciment, des granulats et de l'eau.

La différence entre ces deux types de bétons réside dans la nature (type) de ciment et des granulats utilisés et la façon dont ils agissent. La nature de ces derniers destinés aux hautes températures est très diverse et n'intervient pas à température ambiante mais seulement lorsque la chaleur sera intense.

Le ciment utilisé appartient à la famille des ciments alumineux. L'effet d'augmenter le pourcentage de ce type de ciment dans le béton augmente aussi la résistance à la température de ce dernier.

Les granulats utilisés sont des granulats réfractaires.

Quant aux granulats réfractaires, ils proviennent des roches réfractaires. Ces granulats peuvent être des briques concassées (350-800°C), de la chamotte (800-1200°C), du corindon ou de la zircone (1200-1800°C) [12].

Autres granulats peuvent être utilisés, exemple : gibbsite calciné, sillimanite, alumine tabulaire, etc. on peut aussi citer la micro silice, le sulfate d'aluminium, l'Andalousie, la bauxite, la milite et le corindon tandis qu'aux fins d'isolation, il est possible d'utiliser la perlite. Il va donc s'opérer, sous l'action des hautes températures, entre les différents liants, des réactions chimiques de sorte que la nature du matériau final va complètement être modifié.

En effet, les granulats réfractaires, sont des sous-produits industriels obtenus à partir de la cuisson à 1300°C d'une argile riche en alumine.

Le dosage doit être de 400kg/m<sup>3</sup> de ciment et le rapport eau/ciment de 0.4 au maximum. Mis à part les liants et les granulats, des composés minéraux sont utilisés pour la composition des bétons réfractaires. Le choix de ces matériaux dépend des propriétés physiques, chimique ou de la résistance que l'on souhaite obtenir en terme d'absorption de chaleur ou d'isolation, de conductivité et de résistance aux chocs mécaniques.

### **I.7.1.Principaux constituants [13]**

Les bétons réfractaires sont constitués d'un mélange d'agrégats réfractaires de grande taille (pouvant atteindre plusieurs millimètres), de poudres fines (de taille micronique à submicronique), et d'un liant hydraulique. Le liant hydraulique, généralement un ciment alumineux, assure la tenue mécanique des matériaux à froid. Lors de la première utilisation du

produit en température, cette liaison est progressivement remplacée par celles issues du frittage de l'ensemble des poudres fines (matrice).

#### **I.7.1.1.Ciment alumineux :**

Le ciment alumineux découvert en 1908 et mis sur le marché en 1916 présente notamment les qualités particulières suivantes : durcissement rapide, possibilité de bétonnage par temps froid, résistance aux agents agressifs tels que l'eau de mer, les eaux et les terrains séléniteux, les eaux naturelles pures ou légèrement acides, les eaux d'égouts, certaines eaux industrielles, réalisation de ciments à prise réglable par mélange avec le ciment Portland. Malgré ces qualités reconnues, plusieurs altérations de bétons de ciment alumineux ont été observées. On a constaté que ces incidents sont de trois ordres : l'hydrolyse alcaline, l'altération du béton dans une ambiance chaude et humide, la corrosion des armatures. Cet article étudie les causes de ces altérations et les remèdes pour les éviter finalement

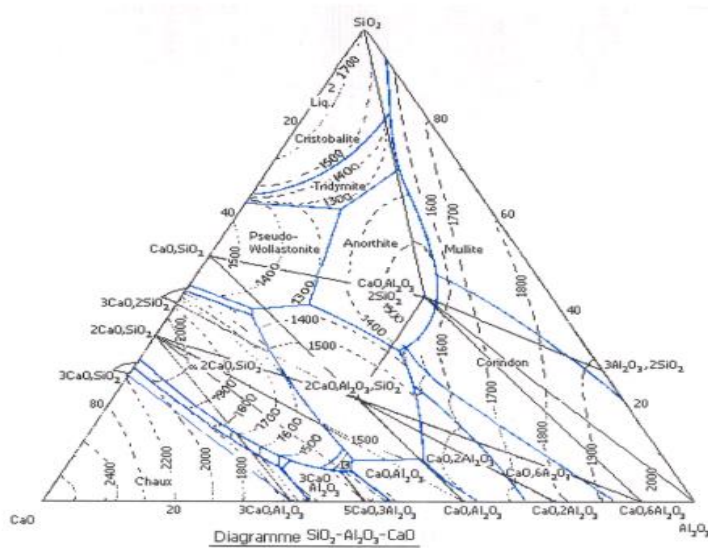
Les études et les travaux réalisés au cours des dernières années ont montré qu'il est actuellement possible d'utiliser le ciment alumineux sans risquer de désorganisation ultérieure, à la condition toutefois de prendre certaines précautions. Ces précautions sont maintenant bien définies et ne prêtent plus à ambiguïté [14].

En effet, le ciment alumineux ou ciment d'aluminates de calcium est un ciment composé de manière prédominante d'aluminates de calcium. Ce ciment est aussi appelé ciment à base d'aluminates de calcium ou ciment fondu. Ce type de ciment est utilisé dans la fabrication du béton réfractaire.

Cependant, les ciments Portland constituent le premier groupe du système  $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$  (cf. Fig. I.3). Ce sont les ciments utilisés largement en génie civil. Leur composition ( $\text{C}_3\text{S}$ ,  $\text{C}_2\text{S}$ ,  $\text{C}_3\text{A}$ ,  $\text{C}_4\text{AF}$  1) empêche toute utilisation à des températures supérieures à  $500^\circ\text{C}$  (diminution des propriétés mécaniques).

Le diagramme de phase prévoit, par contre, que les composés d'aluminate de calcium (sous-système  $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3$ ) sont plus appropriés pour des applications haute température que les composés du sous-système  $\text{CaO-SiO}_2$ . Ces ciments alumineux, ou encore ciments à haute teneur en alumine (HTA), furent introduits en France et aux États-Unis dans les années 1920 [5]. Au sein de cette famille de produits, une première composition, résultant de la fusion de bauxite et de calcaire, constitue le groupe des ciments fondus. Malgré une teneur en silice

encore élevée, ils peuvent, en raison d'une quantité importante d'alumine, être utilisés pour des applications réfractaires (jusqu'à 1400°C).



**Figure 3. Diagramme ternaire CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> [3].**

Introduits dans les années 1960, les ciments d'aluminate de calcium à haute pureté résultent du frittage à haute température de chaux et d'alumine. Ces ciments contiennent typiquement moins de 1% en masse d'impuretés en MgO, Na<sub>2</sub>O, SiO<sub>2</sub> et Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

Parmi les différents aluminates de calcium existant, la plus grande réfractarité des phases riches en alumine (cf. **Figure I.3**) conduirait à les privilégier pour des applications hautes températures. Cependant, leur réactivité avec l'eau (cinétique d'hydratation) est d'autant plus grande que la teneur en chaux est élevée (cf. **tableau I.1**). Le compromis souvent adopté consiste à favoriser la formation du mon aluminate de calcium (CA) lors de la fabrication du ciment [15].

Cette phase possède un point de fusion relativement haut (1600°C) et permet le développement de bonnes propriétés mécaniques pendant le temps d'hydratation relativement court disponible lors de la mise œuvre des bétons réfractaires. Bien que moins réfractaire, la phase (en faible quantité) C12A7 est malgré tout souhaitée pour accélérer la prise. Il est également intéressant de noter que la présence de CA<sub>2</sub>, peu réactif lui-même dans le mélange, permet d'augmenter la cinétique d'hydratation du CA [16].

Phases cimentaires	C3A	C12A7	CA	CA2	CA6
C/A	3	1,7	1	0,5	0,2
Réactivité à 20°C	Très rapide	Rapide	Lent	Très lent	Aucun

**Tableau 1. Réactivité avec l'eau des différentes phases d'aluminat de calcium, d'après [17].**

Non hydratable, CA6 n'offre aucun intérêt dans la composition d'un ciment. Par contre, la présence d'alumine permet, lors du premier cycle thermique, de former du CA2 et du CA6 à partir de C12A7 et de CA et donc de rendre finalement le produit plus réfractaire.

#### **I.7.1.2. Agrégats :**

Composant la plus «grosse» partie d'un béton réfractaire, les agrégats constituent par leur taille (jusqu'à plusieurs millimètres) et par leur quantité (de l'ordre de 70% en masse), le squelette du produit. Ils confèrent au béton l'essentiel de ses propriétés physiques (mécanique, thermique) et chimiques (corrosion). Ces agrégats peuvent être d'origine naturelle, non-calcinés (andalousite ou zircon), ou calcinés (cyanite, bauxite, dolomie ou encore magnésie). Cependant, afin de s'affranchir des impuretés inévitablement présentes dans ces matières premières, pour l'obtention de meilleures propriétés à haute température, des agrégats d'origine synthétique peuvent également être utilisés. Il s'agit d'alumine tabulaire, d'alumine électrofondue (corindon blanc ou brun), de milite synthétique, de spinelle ou encore de carbure de silicium [18] [19]. Par leur rigidité relativement élevée, les agrégats gouvernent le comportement mécanique des produits réfractaires dans lesquels ils interviennent (propriétés d'élasticité, loi de comportement, contrainte à rupture) et, par leur très faible surface spécifique liée à leur taille grossière, ils assurent une moindre réactivité vis à vis du milieu environnant (souvent corrosif). Le choix de la nature de ces agrégats dans un béton résulte d'un "savant compromis" entre les propriétés physiques requises (rigidité, dilatation, conduction thermique), la thermostabilité avec leur environnement (moindre réactivité avec d'autres phases en présence), le caractère néfaste de certaines impuretés (toujours plus ou moins présentes) et le coût tolérable sur le marché (fonction des performances attendues). Une

porosité (du béton) réduite étant garante de performances accrues, l'obtention de bonnes propriétés mécaniques nécessite le choix d'une

Granulométrie réfléchi pour les agrégats [20] [21]. Par le passé, les bétons réfractaires conventionnels, avec des granulométries d'agrégats non optimisées, devaient être mis en œuvre avec une proportion élevée de ciment (15 à 35% en masse) et une quantité importante d'eau de gâchage. Dans de telles conditions, l'eau, servant principalement à combler les interstices entre agrégats, est génératrice d'une quantité importante de porosité et la phase de déshydratation du ciment, lors de la première utilisation en température, conduit à un effondrement des propriétés mécaniques entre 300 et 800°C [22]. En outre, à haute température, la proportion élevée de chaux, en générant beaucoup de phase vitreuse avec les impuretés des agrégats, diminue la réfractarité du produit.

### **I.7.1.3. Matrice :**

La formulation de bétons réfractaires à haute performance passe également par la conception d'une matrice (classe granulométrique typiquement inférieure à 200 $\mu$ m) adéquate autour des agrégats [23]. Elle complète l'empilement granulaire des agrégats dans la partie fine et est le lieu de l'essentiel des évolutions physico-chimiques du béton, de la mise en œuvre à la première montée en température. Les démarches d'optimisation de l'empilement granulaire s'appuient principalement sur les modèles proposés par Furnas en 1920 [24] et Andreasen en 1931 [25], puis revus par Funk et Dinger en 1992 [26]. Ces modèles analytiques, qui visent à obtenir une compacité maximale d'un mélange de poudres, conduisent à la définition d'un coefficient  $q$ , caractéristique de la distribution granulométrique, qui doit alors, dans la version la plus récente, suivre l'expression suivante CPFT (%) 100 Equation 1-1 avec CPFT exprimant le pourcentage volumique cumulé de particules plus fines que le diamètre  $D$ ,  $D_s$  et  $D_l$  les dimensions de la plus petite et de la plus grande particule, respectivement. Des simulations numériques ont montré que le maximum de compacité du système était atteint pour une valeur théorique de 0,37 du coefficient  $q$ . En pratique, une valeur plus faible, correspondant à une plus grande proportion de petites particules, est généralement nécessaire pour augmenter la mobilité au sein de l'empilement granulaire (comportement rhéologique du mélange). Ainsi, un coefficient  $q$  typiquement compris entre 0,21 et 0,31 est généralement choisi pour l'élaboration des bétons réfractaires. Dans cet objectif d'optimisation de la compacité, les progrès ont, dans un premier temps, consisté à remplacer une partie du ciment par des particules ultrafines d'argile, d'alumine ou de microsilice [3] [27].

D'un point de vue rhéologique, les propriétés exceptionnelles de cette microsiline (particules submicroniques de forme sphérique), permettent, dans une certaine mesure, de la substituer à l'eau pour assurer une bonne viscosité du mélange [28]. Par ailleurs, une adjuvantation très appropriée a également permis d'abaisser considérablement la demande en eau de gâchage nécessaire pour la mise en œuvre. Depuis les années 1970, les progrès ainsi réalisés ont conduit au développement de nouvelles générations de bétons réfractaires, caractérisés par une faible teneur en ciment et une faible demande en eau. Par convention, la teneur totale en CaO contenue dans le béton permet de les classer comme suit [28]: les bétons dits à basse teneur en ciment (BTC) (teneur en CaO de 1 à 2,5%) et les bétons dits à ultra-basse teneur en ciment (UBTC) (teneur en CaO de 0,2 à 1%) [29] [30].

## **8. Pathologies voir défaut du béton réfractaire [31] :**

### **8.1. Causes et préventions des altérations du béton (Ségrégation/ fissuration et retrait) [31]:**

#### **8.1.1. Ségrégation [31]:**

##### **8.1.1.1. Les diverses formes de ségrégation :**

###### **8.1.1.1.1. Définition:**

La ségrégation est une séparation des constituants du béton frais (béton qui n'a pas encore entamé son processus de prise ou de durcissement et qui a la capacité de se déformer ou de s'écouler) qui peut se produire chaque fois que celui-ci est transporté ou mis en mouvement (déchargement, pompage, mise en place, compactage) ou simplement sous l'effet gravitaire quand le béton est en repose.

La ségrégation a toujours des conséquences importantes sur l'aspect du béton et le plus souvent aussi sur sa résistance et sa durabilité. Elle peut résulter d'une séparation entre:

- les différentes formes granulaires
- les granulats et la pâte de ciment
- les fines et l'eau de gâchage

Parmi les formes les plus courantes de ségrégation, il faut mentionner :

- les nids de gravier: concentrations locales de gros granulats (**fig. I.4.1.1**)
- les remontées d'eau appelées aussi veines de sable : eau séparée ou excédentaire remontant le long des faces verticales lors du compactage (**fig. I.4.1.2**)

- le ressuage : accumulation d'un excédent d'eau sur les surfaces horizontales du béton, il en résulte des surfaces irrégulières, farineuses ou poreuses (**fig. I.4.1.3**)
- les micro-ségrégations (ciment/fines) sont souvent plus gênantes pour l'œil que pour la qualité (**fig. I.4.1.4**)

### 8.1.1.1.2. Causes:

Les causes principales des divers types de ségrégations sont les suivantes :

- Consistance trop fluide du béton frais.
- Dosage excessif du plastifiant ou du superplastifiants.
- Mise en place incorrecte du béton (vibration exagérée, absence de tube pour des hauteurs de chute élevées, déversement du béton contre un coffrage vertical.
- Formulation inadéquate du béton (mauvaise recombinaison des fractions granulaires, dosages en fines insuffisant, dosage en eau excessif)
- Dimension des granulats trop importante par rapport aux dimensions de l'élément à bétonner et à l'épaisseur d'enrobage des armatures.
- Temps de malaxage trop court.
- Mauvaise étanchéité des joints de coffrage, pertes de laitance (effet de filtre)
- Armature trop dense (effet de tamis).



**Figure 4. Les quatre figures représentant les causes des diverses formes de ségrégation [31]**

### **8.1.2. Fissuration et retrait [31] :**

#### **8.1.2.1. Généralités:**

Le béton est un matériau pour lequel il est difficile d'éviter l'apparition de fissures. Sa résistance à la traction est en effet très faible en comparaison de celle à la compression. Par prudence, les normes imposent dans la plupart des ouvrages en béton. L'apparition de fissures est ainsi inéluctable dès que les sollicitations de traction dans le béton atteignent ou dépassent la valeur de sa résistance à la traction, qui est de l'ordre de 2 à 3 N/mm<sup>2</sup> pour les bétons courants.

Sollicitations et le risque de fissuration qui en découle peuvent avoir pour origine l'un ou plusieurs des facteurs suivants :

- le retrait du béton
- le tassement de fondation
- les variations de température
- les charges (poids propre, trafic, etc.)
- le gel (ce phénomène n'existe pas à Goma)
- des réactions chimiques (corrosion de l'armature, réaction alcali-silice, attaque sulfatique,...)

La fissuration est rarement préjudiciable pour la stabilité d'un ouvrage, lorsqu'elle est maintenue à un niveau acceptable grâce à des mesures appropriées.

Néanmoins, outre l'atteinte portée à l'aspect de parements en béton, l'apparition de fissures peut cependant s'avérer préjudiciable pour la durabilité de l'ouvrage dans la mesure où elles constituent des canaux privilégiés pour la pénétration de substances agressives susceptibles de détériorer le béton et les armatures.

Grâce à certaines mesures, il est possible de réduire fortement voir même dans certains cas d'empêcher le risque et l'ampleur de la fissuration. Pour y parvenir, les séries de mesures suivantes sont plus ou moins efficaces, en fonction de l'origine des fissures :

- La conception, le dimensionnement et les dispositions constructives de l'ouvrage
- Le choix des étapes de construction et de bétonnage
- La composition et le cure du béton

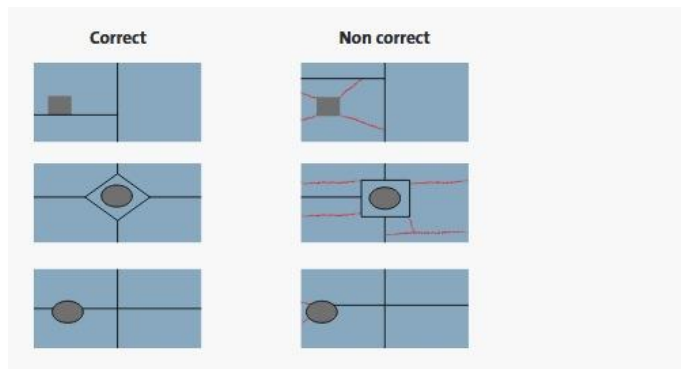


Figure 5. Le mauvais positionnement du joint à provoquer la fissure [31].

#### 8.1.2.2. Conception, dimensionnement et disposition constructives de l'ouvrage :

Le choix du système statistique, du nombre et de l'emplacement des joints influence fortement le niveau des contraintes de traction générées dans le béton par le retrait, le fluage ou les déformations consécutives au chargement des éléments.

La mise en œuvre d'une précontrainte peut empêcher la fissuration, en raison des contraintes de compression qu'elle génère dans le béton et qui s'opposent aux sollicitations de traction et à la fissuration.

La présence d'une armature passive (armature minimale selon les normes): n'empêche en aucun cas l'apparition des fissures, elle permet uniquement de limiter leur ouverture à une valeur acceptable et modulaire en fonction de la quantité d'armature mise en place. Les normes de calcul de structure en béton (**Eurocode 2**) permettent de dimensionner l'armature passive en fonction des ouvertures de fissures autorisées (généralement 0,3 mm).

L'apparition de fissures dans un ouvrage en béton résulte aussi parfois de certains choix peu judicieux, voire erronés, concernant la conception, le dimensionnement ou les dispositions constructives, par exemple :

- Capacité portante insuffisante
- Répartition inadéquate des armatures
- Mauvaise disposition ou absence de joints (**fig. I.5**)
- Apparition de sollicitations imprévues ou excessive dues au choix des appuis du système porteur, au tassement différentiel des fondations ou des mouvements du sol.

### 8.1.2.3. Etapes de construction et de bétonnage :



**Figure 6. Fissure dans une construction supposée étanche [31]**

Pour des constructions qui ne peuvent pas être fractionnées par des joints, le choix des étapes de construction et de bétonnage joue également un certain rôle en ce qui concerne le risque de fissuration.

Le retrait du béton au cours de son durcissement ne se fait pas de façon linéaire. Important à jeune âge, il diminue au cours du temps. Il est donc préférable que les différentes étapes de bétonnage d'une structure en béton se fassent avec un minimum de décalage. Ceci vaut typiquement pour le coulage de voiles sur une dalle de fondation coulée au préalable, où le retrait différentiel (plus grand pour le voile que pour la dalle qui a déjà subi une partie de son retrait) et empêché par la dalle, peut provoquer des fissures (**fig. I.6**).

Il est venu plus recommandé de soigner les étapes de bétonnage des voiles d'une certaine longueur (**fig. I.7 haut**).

Dans les grands ouvrages, le risque de fissuration peut aussi être considérablement réduit en créant des brèches de clavage, à savoir des joints provisoires de retrait, laissés ouverts si possible durant quelques mois et bétonnés ultérieurement (fig. I.7 bas I.8)

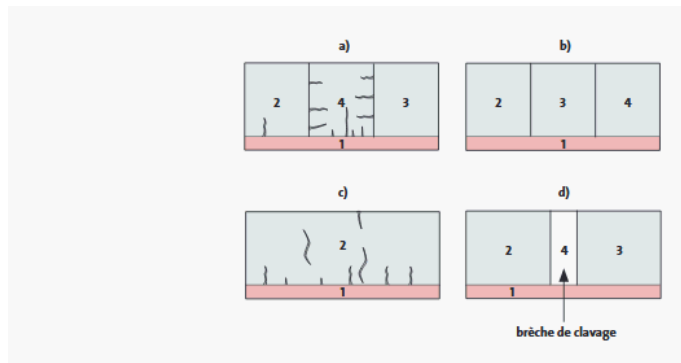


Figure 7. Étape de bétonnage d'un mur de soutènement a) et c) solutions défavorables, b) et d) solutions favorables [31].



Figure 8. Brèches de clavages coulés ultérieurement lors de la réalisation d'une dalle [31].

#### **8.1.2.4. Composition et cure du béton:**

Les choix relatifs à la composition du béton et aux mesures de cure sont déterminants pour l'intensité des déformations de retrait et le risque de fissuration qui en découle. Les différents types de retrait et les mesures préventives correspondantes sont traités ci-après.

Il est important de faire la distinction entre les différents types de retrait et leurs conséquences (types de fissures et délai d'apparition), afin de pouvoir prendre les mesures préventives les plus appropriés dans chaque cas (**tableau I.2**)

#### **8.1.2.5. Types de retrait:**

On entend en général par retrait, la diminution du volume du béton causée par le tassement du béton frais (retrait de tassement), le départ d'eau (retrait plastique, retrait de dessiccation) ainsi que par l'hydratation du ciment (retrait endogène) ou encore par des phénomènes thermochimiques (retrait thermochimique).

## ÉTUDE D'UN BETON RÉFRACTAIRE SERVANT A LA RÉPARATION DES CHAUSSÉES DE LA VILLE DE GOMA

Type de retrait	Ordre de grandeur (mm/m)	Risque de fissuration (délai d'apparition)	Risque de fissuration (Type de fissure)	Utilité/Efficacité des mesures (Composition du béton)	Utilité/Éfficacité des mesures (Cure)	Utilité/Éfficacité des mesures (Armature)
Retrait de tassement	jusque 1%	Avant la prise	Superficielles	Très élevées	Nulle	Nulle
Retrait plastique 1)	jusque 4	Avant ou pendant la prise	Superficielles	Faible	Très élevée	Nulle
Retrait de dessiccation 2)	0,3 à 0,8	Quelques jours à une année après bétonnage	Superficielles à traversantes	Moyenne	Très élevée	Très élevée
Retrait endogène 3)	0,04 à 0,1 (E/C ≥ 0,45) jusqu'à 1 (BUHP)	Quelques semaines à une année après bétonnage	Internes	Moyenne	Nulle	Élevée
Retrait thermique	0,01 ΔT°	10h à une semaine après bétonnage	Superficielles, traversantes ou internes	Très élevée	Nulle 3)	Moyenne

1) évaporation de l'eau du béton frais (synonymes : retrait précoce ou retrait capillaire).

2) départ de l'eau du béton durci (par évaporation et/ou par « consommation » endogène).

3) la présence thermochimique peut jouer un rôle favorable.

**Tableau 2. Risque de fissuration en fonction du type de retrait [31].**

#### 8.1.2.5.1. Retrait de tassement :

Le tassement du béton frais (tassement plastique) est provoqué par la sédimentation des particules solides et la remontée simultanée de l'eau à la surface sous l'effet des différences de masse volumique (ségrégation). Il se produit avant la prise du béton, c'est à dire juste après la mise en place et le compactage.

Dans des cas défavorables, le tassement peut atteindre 1% de l'épaisseur de l'élément de construction. Puisque le béton au jeune âge ne possède qu'une faible rigidité, il peut se fissurer au niveau des différences d'épaisseur ou de géométrie de la structure ou au-dessus des barres d'armature, surtout si l'épaisseur d'enrobage est faible (**fig. I.9**).



**Figure 9. Réseau orthogonal de fissures de tassement (vue globale et détail) [31]**

#### **8.1.2.5.1.1. Mesures préventives :**

La fissuration induite par le tassement du béton frais peut être évitée ou limitée par les mesures suivantes :

- Choix d'une consistance du béton frais plus ferme
- diminution de la quantité d'eau de gâchage
- Augmentation de la teneur en fines et utilisation d'un ciment plus fin, afin d'enlever le pouvoir de rétention d'eau et de réduire le ressuage
- Utilisation de gravillons (semi-) concassés
- Bétonnage des éléments de construction massif en plusieurs couches frais sur frais ou bétonnage plus lent.

Les fissures formées dans le béton frais peuvent être refermées par un compactage et un traitement ultérieur. Cette mesure n'est cependant efficace que si elle est réalisée au bon moment, c'est-à-dire avant le début de la prise.

#### **8.1.2.5.2. Retrait plastique :**

Le retrait plastique, dénommé parfois aussi retrait précoce ou retrait capillaire (parce qu'il se produit avant la fin de la prise du ciment), est dû à une déperdition rapide de l'eau, aussitôt après la mise en place du béton.

Cette perte d'eau est imputable à une évaporation excessive ou à une forte absorption par les coffrages elle fond. Il en résulte un retrait notable (le retrait plastique peut aller jusqu'à 4mm/m dans des conditions sévères) dans les couches où la perte est importante, alors que le reste du béton est peu affecté. Des tensions internes se développent alors entre les couches soumises à ces retraits différents. Si ces tensions dépassent la résistance du béton à la traction (faible au début, par définition), elles produisent des fissures de quelques centimètres de profondeur et en général non traversantes, qui peuvent mesurer jusqu'à 1 mm d'ouverture, voire davantage.

Les éléments horizontaux (radiers, planchers, dallages, dalles de compression,...) sont les plus menacés par le retrait plastique (**fig. I.10**)

Le risque inhérent au retrait plastique est d'autant plus grand que le béton présente des performances élevées grâce au choix d'un rapport E/C faible. Plus la quantité d'eau est faible, plus le béton est sensible à une dessiccation précoce.

Outre l'altération esthétique du béton qu'elles constituent, ces fissures peuvent aussi être à l'origine d'une désagrégation du béton, en cas d'infiltration d'eau suivie de gel par exemple.

De plus la déperdition d'eau peut empêcher une bonne hydratation du ciment. La surface du béton présentera alors une perte de résistance et une porosité élevée. Dans un environnement défavorable, ce béton aura un comportement insatisfaisant : infiltration d'eau, descellement des gros granulats, aspects farineux et éclats en surface.

Ces fissures peuvent être refermées en surface lors du lissage du béton. Si esthétiquement le résultat est satisfaisant, elles subsistent cependant à l'intérieur du béton et sont des amorces pour une fissuration ultérieure du béton en surface.



**Figure 10. Fissures de retrait plastique, dues à l'absence ou la mise en œuvre trop tardive de cure [31].**

#### **8.1.2.5.2.1. Mesures préventives :**

Voici quelques mesures préventives pour éviter une fissuration précoce due au retrait plastique :

- Mettre en œuvre rapidement les mesures de cure décrites précédemment afin de limiter au maximum l'évaporation.
- Prévenir l'absorption d'eau par les coffrages ou le fond en les saturant au préalable.
- Éviter, dans la mesure du possible, les travaux de bétonnage lors de conditions météorologiques défavorables, telles que des températures très élevées ou un vent important. Si cela n'est pas possible, appliquer les recommandations spécifiées dans le guide pratique du bétonnage par temps chaud, du stade frais au stade durci.
- Envisager l'ajout de fibres de polypropylène au béton (voir les informations sur les additions et les ajouts de constituants du béton). Cela peut contribuer à améliorer la résistance à la fissuration causée par le retrait plastique.

Il est important de noter que ces mesures préventives peuvent varier en fonction des conditions spécifiques du projet et des recommandations des normes et guides de construction applicables. Il est donc recommandé de consulter les experts du domaine et de se référer aux directives appropriées pour une mise en œuvre adéquate.

#### **8.1.2.5.3. Retrait de dessiccation :**

Le retrait de dessiccation ou retrait hydrique est dû à la diminution de volume du béton que l'on observe au fur et à mesure de son séchage dans le temps. Plus la quantité d'eau non liée s'évapore, plus le retrait du béton est élevé. Ce processus de séchage et le retrait qui en résulte sont d'autant plus importants que l'humidité du milieu environnant est faible.

Le retrait de dessiccation est d'autant plus élevé et rapide que l'excès d'eau non liée est important, car la porosité et la perméabilité du béton augmentent, ce qui accélère encore le phénomène de séchage. La valeur finale du retrait de dessiccation se situe généralement entre 0,3 et 0,8 mm/m. La maîtrise du retrait de dessiccation passe donc principalement par une réduction de la quantité d'eau dans le béton. Une granulométrie bien serrée du squelette du béton favorise également la diminution du retrait de dessiccation.



Figure 11. Maîtrise des effets du retrait par fractionnement [31].



Figure 12. L'absence de joints dans les glissières de sécurité provoque des fissures régulières dues au retrait de dessiccation [31].

#### 8.1.2.5.3.1. Mesures préventives :

Les mesures suivantes permettent d'éviter la fissuration due au retrait de dessiccation :

- Choisir une granularité continue appropriée, de manière à minimiser la porosité du béton et à réduire le plus possible sa demande en eau.
- Réduire à un niveau optimal le rapport E/C au moyen de superlatifiant ( $E/C \leq 0,50$ ).
- Prévoir soit un fractionnement de l'élément par des joints de retrait (**fig. I.5** et **fig. I.9**) soit une armature minimale suffisante et/ou des fibres métalliques, de manière à répartir la fissuration (l'apparition de multiples microfissures est souvent moins préjudiciable que l'apparition de fissures moins nombreuses et largement ouvertes). Choisir judicieusement les étapes de bétonnage (**fig. I.6** et **fig. I.7**).
- Appliquer les mesures et les durées de cure recommandées ci-haut.

#### 8.1.2.5.4. Retrait endogène :

En l'absence de tout contact avec l'extérieur et donc de perte d'eau vers l'extérieur, le béton est soumis au retrait endogène, qui a une double origine.

Le retrait chimique est une contraction volumique (appelée contraction Le Chatelier) au cours de l'hydratation du ciment, le volume des hydrates formés étant en effet plus petit que la somme des volumes initiaux occupés par l'eau et le ciment anhydre. Cette réduction de volume est de l'ordre de 8 à 12%, et est notamment à l'origine de la structure poreuse du béton. L'hydratation progressive lie chimiquement l'eau libre.

Lorsqu'il n'y a plus d'eau libre dans les pores capillaires, l'eau présente dans les pores de gel est consommée.

Les pores se vident et l'humidité relative interne baisse.

Cette «dessiccation interne» induite par l'hydratation, est appelée auto-dessiccation.

Le retrait endogène dépend du rapport E/C. Plus le rapport E/C du béton est faible, plus la part du retrait endogène sera élevée. Pour des bétons usuels, dont le E/C est  $\geq 0.45$ , il est pratiquement négligeable, de l'ordre de 0,1 mm/m.

Pour les BHP, et plus encore pour le BUHP, il peut atteindre des valeurs allant jusqu'à 1mm/m.

#### 8.1.2.5.5. Retrait thermique :

La chaleur dégagée par l'hydratation du ciment est à l'origine de gradients de température. Ces gradients peuvent encore être accentués par l'hydratation accélérée à température plus élevée.

Après la nette élévation de température qui accompagne la prise, le béton au jeune âge se refroidit au contact de son environnement et, de même que la plupart des matériaux, il diminue de volume quand sa température s'abaisse. Comme le béton refroidit naturellement plus vite en surface qu'en profondeur, des tensions internes peuvent naître entre la zone interne qui se contracte moins et la zone externe qui se contracte plus (**fig. I.13**). Ces tensions peuvent provoquer des fissures superficielles.

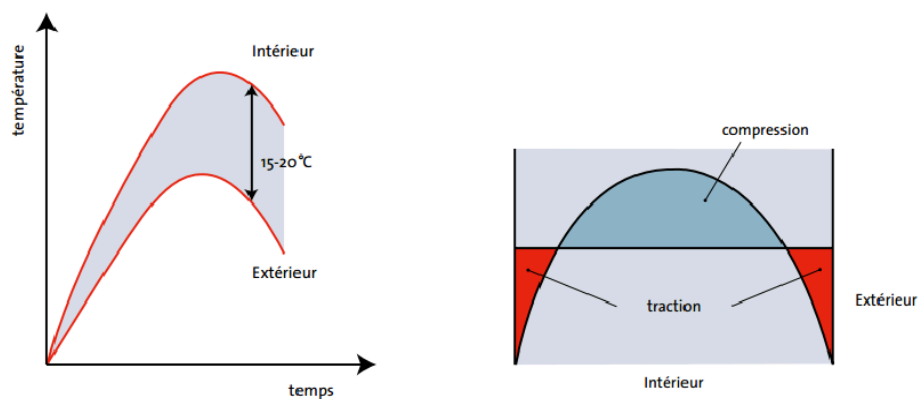
D'autre part, comme pour le retrait hydrique, si le béton n'est pas libre de se raccourcir, le retrait dû au lent refroidissement général peut souvent occasionner une fissuration profonde plus ou moins importante, parfois traversantes.

##### 8.1.2.5.5.1. Mesures préventives :

- Utiliser un ciment ayant une faible chaleur d'hydratation (type LH) et/ou limiter le dosage du ciment (éventuellement spécifier la résistance<sup>4</sup> à un âge au-delà de 28 jours).
- Eviter un gradient de température très important lors de l'échauffement du béton (coffrage bois ou protection thermique).
- Mesurer le gradient de température cœur / peau par des sondes de températures et éviter de décoffrer lorsque la température du béton est maximale à cœur afin de limiter l'ampleur du choc thermique lors du décoffrage (brusque refroidissement du béton à la surface).
- Choisir judicieusement les étapes du bétonnage (**fig. I.7**).
- En cas de surface libre importante, isoler la surface.

#### 8.1.2.5.2. Règles pratiques :

- Des fissures de gradient thermo-chimique (généralement superficielles) dont à craindre si la différence de température entre le cœur et la peau de la pièce dépasse  $15^{\circ}\text{C}$ .
- Des fissures de retrait empêché (généralement traversantes) sont à craindre pour des différences à partir de  $20^{\circ}\text{C}$ .
- Prévoir une armature passive dans les zones à risques élevés, en prenant soin de placer les armatures horizontales le plus proche possible du coffrage (en respectant les règles minimales d'enrobage). Le pourcentage d'armature est de préférence reparti en armatures de plus petit diamètre et rapprochées.



**Figure 13. Diagramme des contraintes suite à une différence de température de  $15-25^{\circ}\text{C}$  entre la face externe et le cœur du béton [31]**

### 8.1. 3. Efflorescence [31]:

#### 8.1.3.1. Qu'entend-on par efflorescences ?

Les efflorescences sont des taches généralement blanches qui apparaissent à la surface du béton.

Elles sont dues aux substances dissoutes dans l'eau lors du malaxage ou produites par l'hydratation du ciment, et qui se déposent en surface aux endroits où l'eau s'évapore au fur et à mesure du séchage du béton.

Les efflorescences les plus répandues sont dues à l'hydroxyde de calcium (ou hydrate de chaux) libéré lors de l'hydratation du ciment. On parle alors des efflorescences de chaux (aussi appelés exsudations).

En s'évaporant de la surface du béton, l'eau laisse un résidu d'hydroxyde de chaux que le gaz carbonique de l'air va rapidement transformer en carbonate de calcium insoluble. La répétition des alternances entre l'état sec et l'état mouillé à la surface du béton peut rendre ce dépôt assez épais pour être visible sous forme d'une tache blanche (**fig. I.16**).

Nous pouvons distinguer les efflorescences primaires et les efflorescences secondaires :

- Les efflorescences primaires surviennent lors de la prise du béton avant que celui-ci n'ait été exposé aux intempéries.
- Les efflorescences secondaires surviennent après la prise du béton, soit en conséquence de l'exposition à la pluie soit suite à l'achèvement de la prise du ciment.

#### 8.1.3.2. Effet des efflorescences

Les efflorescences n'ont aucune influence sur les caractéristiques mécaniques des éléments : pas de diminution de la résistance mécanique, de la résistance à l'usure, de la résistance au cycle gel dégel et aux sels de déverglaçage (les phénomènes gel, dégel ainsi que déverglaçage n'existent pas à Goma),...

Si les efflorescences nuisent dans un premier temps à la qualité esthétique du béton, elles s'atténuent voire disparaissent quelques années après la mise en œuvre des éléments en béton.

### 8.1.3.3. Quand se forment les efflorescences dues à la chaux ?

Les conditions atmosphériques auxquelles le béton est soumis jouent un rôle important.

Un environnement alternativement sec et humide du béton au jeune âge constitue une condition favorable à l'apparition d'efflorescences de chaux. Elles se forment généralement surtout par temps froid et humide. La pluie, la neige, le brouillard et la rosée favorisent leur



apparition.

**Figure 14. Efflorescence sur un élément en béton (vue global et détail) [31]**

### 8.1.3.4. Elimination des efflorescences:

Les dépôts de carbonate de calcium s'atténuent ou disparaissent dans le temps sous l'effet de la pluie.

Le nettoyage peut être accéléré en traitant la surface à l'aide par exemple d'une solution d'acide chlorhydrique (de maximum 3%). Il est conseillé de tout d'abord saturer d'eau le béton afin que l'acide n'y pénètre pas trop et n'agisse qu'en surface. Après réaction, il faut rincer abondamment à l'eau, afin d'éviter une action ultérieure de l'acide sur le béton lui-même.



**Figure15.Efflorescences sur un mur en béton soumis à la pluie après décoffrage [31]**



**Figure 16. Efflorescences sur blocs bétons soumis à une alternance sec-humide [31]**

### 8.1.3.5. Mesures préventives:

Il est difficile d'éviter totalement le risque d'efflorescences sur des éléments en béton qui seront obligatoirement exposés aux intempéries.

On peut tout de même diminuer ce risque en appliquant les mesures suivantes :

- Diminuer la quantité d'eau de gâchage (utiliser des plastifiants ou superplastifiants) en vue d'obtenir un béton compact, le moins poreux possible.
- Abriter le béton au jeune âge de la pluie et de l'ensoleillement direct.
- Curer les éléments préfabriqués dans des conditions d'humidité suffisamment élevée (mais pas saturée), vérifier l'absence de condensation. Ne pas empiler les produits directement les uns sur les autres.
- Utiliser des ciments aux ajouts (laitier, cendres volantes,...) qui produisent moins de chaux lors de leur hydratation.
- L'utilisation d'enduits ou de peintures de protection est possible, mais doit inévitablement passer par le conseil d'un spécialiste.

L'apparition d'efflorescences est un phénomène qui dépend de très nombreux facteurs, difficiles à maîtriser, voire incontrôlables, car souvent liés au microclimat local. Il faut en conséquence adapter au cas par cas les mesures préconisées et, au besoin, faire des essais afin de définir la méthode la plus efficace.

#### **8.1.4. Attaque sulfatique externe [31]**

##### **8.1.4.1. Attaque par les sulfates d'origine externe**

Les eaux sulfatées (ou eaux séléniteuses) ou les sols riches en sulfates constituent un milieu agressif pour le béton durci. En se combinant avec l'aluminat tricalcique (hydraté ou anhydre) de la pâte de ciment durcie, les sulfates dissous dans l'eau donnent naissance à des composés expansifs, l'ettringite (ou sel de Candlot).

On considère généralement l'environnement potentiellement agressif si le béton est en contact avec des eaux souterraines contenant plus de 600 mg/l de sulfates ou avec des couches de terrain en contenant plus de 3 000 mg/kg (environnement EA2 ou EA3).

##### **8.1.4.2. Domaines de risques et dommages dus aux sulfates d'origine externe**

En surface, les canalisations d'eaux usées ménagères et/ou industrielles ou les réservoirs (de stockage/épuration) peuvent être menacés lorsqu'ils transportent ou contiennent des sulfates en solution.

Sous l'effet des sulfates, l'altération du béton se manifeste par un gonflement, accompagné d'une fissuration importante (**fig. I.17**). L'action des sulfates est toutefois relativement lente, les constructions provisoires ne nécessitent donc aucune mesure particulière.

La présence dans le sous-sol de minéraux sulfatés comme le gypse et l'anhydrite (sulfates de calcium) constitue également un risque dont il faut tenir compte, même dans le cas d'une présence éloignée. En effet les eaux souterraines peuvent dissoudre et transporter très loin des sulfates en solution. L'agression par les sulfates menace donc avant tout les ouvrages ou parties d'ouvrages enterrés.

### 8.1.4.3. Mesures préventives

Lorsqu'il est établi ou prévisible que des éléments en béton seront en contact avec des sulfates dissous dans l'eau ou simplement présents dans le sol, il est nécessaire de prendre les précautions suivantes :

- Utiliser un ciment à résistance élevée aux sulfates (HSR) conforme à la norme NBN B12-108.

On peut alors choisir entre :

- les ciments CEM I-SR
  - les ciments à base de laitier CEM III/B-SR ou CEM III/C-SR qui contiennent plus de 65% de laitier
  - les ciments CEM V/A HSR.
- Ne mettre en œuvre que des bétons très compacts, donc à faible porosité.
  - Limiter le rapport E/C selon la classe d'environnement.
  - Tenir compte du fait que la capillarité peut faire remonter les eaux séléniteuses assez haut dans les structures.



**Figure 17. Dégradation d'éprouvettes de béton soumis à un test de résistance aux sulfates [31]**

### 8.1.5. Réaction sulfatique interne [31]

La Réaction Sulfatique Interne (RSI), appelée également DEF (Delayed Ettringite Formation) est une réaction pouvant se produire dans certaines conditions entre du sulfate contenu dans le béton et les aluminates. La présence d'eau est nécessaire à la réaction.

Ce phénomène nécessite la conjonction de plusieurs paramètres (température élevée de durcissement, durée du pic de température, composition du ciment, présence d'eau à la surface du béton). Ces sulfates en excès proviennent principalement de la décomposition, à haute température, en mono-sulfoaluminate, de l'ettringite primaire (tri-sulfoaluminate), formée au cours de l'hydratation du ciment.

Après durcissement du béton, plusieurs semaines à plusieurs années, si le béton est en présence d'eau, ce sulfate en excès va se combiner avec des aluminates pour reformer de l'ettringite appelée différée. L'ettringite est un composé expansif. L'ettringite primaire qui se forme durant l'hydratation du ciment a la place pour gonfler, étant donné qu'elle se développe lorsque le matériau n'est pas encore durci. Par contre, l'ettringite différée se forme lorsque le matériau est durci. Elle n'a donc pas la place de gonfler et son développement s'accompagne d'une expansion et d'une fissuration du béton (**fig. I.18**).

#### 8.1.5.1. Moyens pour abaisser la température du béton en cours de durcissement

De nombreux moyens existent pour diminuer la température du béton de pièces massives en cours de durcissement :

- Utilisation de ciments à faible chaleur d'hydratation comme par exemple les ciments au laitier • privilégier les coffrages non isolants (mais attention, défavorable pour le retrait thermique) • refroidir la température de l'eau ou arroser les granulats en été
- mettre en œuvre un système de refroidissement actif (par circulation d'eau froide)
- éviter le bétonnage de pièces massives par temps chaud.



**Figure 18. Pile massive d'un point atteint de réaction sulfatique interne. Le béton a subi une température de 80 °C durant plus de 200 heures [31].**

#### **8.1.5.2. Prévention**

La meilleure des préventions consiste à limiter la température à cœur du béton à 65°C lors de son durcissement. Eu égard au fait que des températures excessives du béton en cours de durcissement peuvent notamment faire baisser les résistances à long terme, provoquer du retrait thermique et donc des risques de fissuration, cette prévention sera largement bénéfique à la qualité intrinsèque du béton. Des dispositions constructives visant à éviter la stagnation d'eau à la surface de béton sont également un moyen de se prémunir de la formation de DEF.

#### **8.1.6. Actions des produits chimiques [31] :**

##### **8.1.6.1. Types d'agression par les produits chimiques**

Face à l'agression de produits chimiques, le béton peut soit se montrer résistant, soit se dégrader plus ou moins rapidement. Les dommages, lorsqu'il y en a, sont essentiellement de deux sortes: agression par érosion chimique et agression par gonflement.

#### **8.1.6.1.1. Agression par érosion chimique:**

L'altération du béton par érosion chimique se produit lorsqu'il y a dissolution de l'un des composants de la pâte de ciment ou du granulat par un agent chimique extérieur (**Voir la fig. I.19: le premier béton au troisième béton**).

Il s'ensuit un lessivage du composant dissout : le béton devient alors de plus en plus poreux et perd de la matière en même temps que son rôle protecteur de l'armature.

Ce processus commence toujours à partir de la surface de contact avec l'agent chimique et progresse (en général lentement) vers l'intérieur du béton.

#### **8.1.6.1.1.2. Agression par gonflement :**

L'altération du béton par gonflement fait suite à la combinaison, à l'intérieur du béton, entre une substance chimique ayant pénétré depuis la surface, un constituant de la pâte de ciment, et l'eau des capillaires.

Lorsque cette combinaison produit un composé solide dont le volume est supérieur à celui des constituants de départ, il en résulte des pressions internes qui peuvent provoquer un gonflement de la masse, associé à une fissuration lente, mais importante. Celle-ci peut se manifester jusqu'à une certaine distance du point de pénétration de la substance agressive.

#### **8.1.6.2. Mesures préventives**

La protection du béton contre les agressions extérieures d'origine chimique nécessite les mesures suivantes :

- choix correct du ciment et dosage approprié
- mise en œuvre d'un béton compact, de faible porosité, avec un rapport E/C faible  $\leq 0,50$
- enrobage suffisant des armatures (prévoir éventuellement une surépaisseur dite « couche sacrificielle »)
- cure soignée du béton
- application des textes normatifs et recommandations.

Les ciments de type CEM III peuvent être recommandés dans tous les cas où des éléments de structure doivent être protégés contre l'agression de substances chimiques (acides, sels ou sulfates).

En cas d'attaque par des sulfates en solution, les mesures ci-dessus doivent encore être associées à l'emploi d'un ciment à résistance élevée aux sulfates. A cet effet, les ciments HSR de type CEM I, CEM III, CEM V sont particulièrement indiqués (**Voir attaque sulfatique externe au point g**).

Dans le cas d'agressions très spécifiques ou de concentration très élevées en agents agressifs (voir NBN EN 206), on complètera les mesures énoncées ci-dessus par l'exécution d'un revêtement de surface spécialement prévu à cet effet (à base de résines synthétiques, de céramique, etc...). En cas de doutes, l'avis d'un spécialiste sera demandé.



**Figure 19.**Exemple de bétons soumis à une attaque acide où le premier béton est tenue correct, le second béton est mauvaise tenue-Granulats siliceux et le troisième béton est mauvaise tenue-Granulats calcaires [31].

## **CHAPITRE II : MÉTHODOLOGIE ET PRÉSENTATION DE L'OBTENTION DU BÉTON RÉFRACTAIRE AINSI QUE LES DIFFÉRENTS ESSAIS EFFECTUÉS SUR LES BÉTONS RÉFRACTAIRES**

### **II.1.Méthodologie**

#### **II.1.1.Méthodologie appliquée à l'obtention du béton réfractaire**

Il est vrai que peu de recherches ont été réalisées sur les bétons réfractaires, ce qui limite notre connaissance de leurs propriétés et de leur comportement mécanique. Cela rend ce domaine complexe et notre travail consiste à représenter fidèlement nos recherches sans déformer notre esprit ni nos interprétations personnelles. L'objectif est d'enrichir nos connaissances sur les bétons réfractaires et de nous plonger progressivement dans le monde des matériaux réfractaires.

Je tiens à préciser que, initialement, notre sujet portait sur la formulation d'un béton réfractaire destiné à la réparation des chaussées de la ville de Goma. Cependant, en raison de contraintes liées à mon niveau d'étude et aux ressources financières, il n'a pas été possible de formuler un béton réfractaire. Le jury m'a donc suggéré de reformuler le sujet en une étude sur un béton réfractaire destiné à la réparation des chaussées de la ville de Goma. Par conséquent, notre méthodologie ne consistera pas à formuler le béton réfractaire, mais plutôt à fournir les éléments nécessaires pour l'obtenir, en nous appuyant sur quelques références disponibles.

Cependant, comme l'indique notre sujet "Étude d'un béton réfractaire", la méthode que nous utiliserons pour mener ce travail s'appuie sur une documentation composée d'ouvrages techniques, de ressources en ligne, de la bibliothèque, ainsi que sur les cours que nous avons suivis tout au long de notre premier cycle d'études. Nous allons également faire preuve de curiosité scientifique en réalisant des entretiens avec des personnes plus expérimentées, en effectuant des visites sur le terrain et en nous appuyant sur notre stage effectué à l'Office des routes, ce qui nous a permis d'en apprendre davantage sur les problèmes rencontrés sur les routes, la dégradation des chaussées et les matériaux utilisés pour leur réparation, notamment les bétons. Toutes ces sources nous aideront à consulter la littérature disponible et à travailler au mieux sur notre sujet.

## II.2.Présentation de l'obtention du béton réfractaire

D'une manière générale le béton, constitue le premier matériau d'aménagement le plus utilisé dans le monde (dix milliards de tonnes !) en raison de son faible coût de production (juste au-dessus de 100 dollars/m<sup>3</sup>). Il peut s'agir d'un mélange de sable, des graviers (granulats) et de ciment, ce dernier garantissant la cohésion de l'ensemble (liant) [32].

Sans les bétons réfractaires de grande diffusion, notre vie quotidienne ne serait sans aucun doute beaucoup moins agréable. En effet, nous ne disposerions pas d'acier, de fonte, d'alliage métalliques, de verre, de céramiques, de ciment ou de cracking pétrole... à un prix raisonnable. L'amélioration de la performance des réfractaires a un impact important sur la productivité des industries utilisatrices (les pertes thermiques), la sécurité du personnel et sur l'environnement (les réfractaires consommés sont difficilement recyclables), le coût de la consommation des réfractaires est très élevé. Par exemple, ils représentent plus de dix pourcent des coûts de transformation d'une aciérie alors le recyclage et la valorisation des déchets sont aujourd'hui considérés comme une solution d'avenir afin de répondre au déficit entre production et consommation et de protéger l'environnement [6].

La fabrication du béton nécessite pour sa mise en œuvre une formulation caractérisée qui évolue en fonction de l'estimation du sable et des graviers.

Le ciment est connu depuis les temps anciens, actuellement on distingue plusieurs types de ciments, notamment : le caementum romain ou ciment de pouzzolane, le ciment Portland et le ciment aux laitiers.

## **II.2.1. Quelques sources de présentation de l'obtention du béton réfractaire**

### **II.2.1.1. PREMIER SOURCE PAR Marc DUSQUESNOY: COMMENT FAIRE DU BETON REFRACTAIRE?**

#### **II .2.1.1.1. Préparation d'une recette de béton réfractaire à partir de la pouzzolane**

Dans cette source, Marc Dusquesnoy explique comment fabriquer du béton réfractaire. Pour la réalisation d'un four ou de tout autre ouvrage exposé à des températures élevées, il est nécessaire d'utiliser du béton réfractaire. La recette de base pour obtenir du béton réfractaire est la suivante : mélanger 2,5 litres de ciment fondu avec 6 litres de pouzzolane. Sur les 6 litres de pouzzolane, compacter environ 1/3 pour 2/3 de graviers [33].

#### **II.2.1.2. DEUXIEME SOURCE D'APRES L'OUVRAGE: LE GRAND GUIDE DE CONSTRUCTION DES MAÇONNERIE DE BRUNO CAILLARD**

Dans cet ouvrage, Bruno Caillard décrit les granulats réfractaires, qui sont des sous-produits industriels obtenus par la cuisson à 1300 °C d'une argile riche en alumine. Le dosage recommandé est de 400 kg/m<sup>3</sup> de ciment, avec un rapport eau/ciment maximal de 0,40. En plus des liants et des granulats, des composés minéraux sont utilisés dans la composition des bétons réfractaires. Le choix de ces matériaux dépend des propriétés physiques, chimiques et mécaniques souhaitées, telles que l'absorption de chaleur, l'isolation, la conductivité et la résistance aux chocs mécaniques [2]

#### **.II.2.1.3. TROISIEME SOURCE EB REFRACTAIRE D'APRES LE FILIALE EQIOM DU GROUPE CRH DES ACTEUR MAJEUR DANS LES MATERIAUX DE CONSTRUCTION DE CIMENTS, GRANULATS ET DE BETON VALORISATION DES DECHETS (www.eqiom.com)**

#### **Conseils et précautions d'emploi du béton réfractaire :**

- Ne pas rajouter d'eau
- Ré-malaxer à l'arrivée des camions sur chantier
- Curer les bétons pour les protéger
- Veiller à la mise en place de dispositions spécifiques pour coulage par temps chaud ou temps froid
- Respecter les règles de l'art, les réglementations et recommandations en vigueur applicables à l'ouvrage [34]

**II.2.1.4. QUATRIÈME SOURCE D'APRÈS LE TRANSFERT DE CLÉMENT  
PONTIER DE L'ENTREPRISE, UNE RÉFÉRENCE EN MATIÈRE DE MATÉRIAUX  
RÉFRACTAIRES ([refrataire@prosiref.com](mailto:refrataire@prosiref.com)).**

**II.2.1.4.1. BETONS REFRACTAIRES ISOLANTS, BETONS REFRACTAIRES  
DENSES [35] :**

**II.2.1.4.2. Conseils de mise en œuvre [35]**

Les bétons Manville sont livrés "prêts à l'emploi". Ils sont élaborés à partir de matières premières sélectionnées dont les granulométries sont soigneusement contrôlées. Il est donc indispensable de respecter les conseils de mise en œuvre pour obtenir les meilleures performances possibles.

**II.2.1.4.3. Préparation du mélange [35]**

Utiliser un malaxeur plutôt qu'une bétonnière. Bien mélanger à sec le contenu du ou des sacs de manière à redistribuer les agrégats et le ciment d'une façon homogène. Il est toujours préférable d'utiliser des sacs complets, si la quantité à utiliser est inférieure à celle contenue dans un sac, il faut vider la totalité du sac, bien mélanger avec une truelle puis prélever la quantité utile. Afin d'obtenir les propriétés optimales, chaque sac de béton nécessite l'addition d'une quantité très précise d'eau. Les quantités d'eau sont indiquées sur les notices en vigueur. Les bétons réfractaires durcissant rapidement doit être ajoutée juste avant l'application. Cette eau de gâchage doit être potable, exempte d'acides, d'alcali, d'huile ou autres impuretés. Dans certain cas, il peut être indispensable d'utiliser de l'eau déminéralisée. La température de l'eau doit être comprise entre 10°C et 20°C (se rapprochant plutôt de 20°C). Il faut éviter la contamination par tous matériaux tels que : huile, sel, sucre, borax, autres bétons réfractaires, mortiers, ciment de Portland et réfractaires plastiques. L'eau devra être ajoutée lentement et graduellement pour éviter l'obtention d'un mélange trop liquide, ce qui aurait pour cause de diminuer la résistance mécanique du béton et d'augmenter son retrait. Un mélange grumeleux peut provenir de l'addition trop rapide d'une grande quantité d'eau. Cependant, la quantité d'eau d'addition peut être légèrement différente de celle recommandée dans la notice. Cette différence est due aux variations normales de la dimension des particules des différents agrégats composant le béton. Un moyen simple et rapide pour déterminer si la teneur en eau est acceptable est le test de la « boule dans la main ». Pour tester une préparation, confectionner dans la main une boule d'environ 50 à 75 mm de diamètre, la jeter en l'air à une hauteur d'environ 75 mm et la laisser retomber dans la main ouverte. Répéter

cette opération plusieurs fois de suite. Si cette boule se brise, le béton est trop sec. Au contraire, si elle s'aplatit, il est trop humide dans le cas d'un béton isolant. S'il « coule » entre les doigts, il est alors trop humide quelle que soit l'utilisation. En effet, la boule de béton doit juste s'affaisser légèrement sans se fissurer. La quantité d'eau peut être modifiée de manière à obtenir une « boule » correcte.

Se rappeler qu'un excès d'eau peut réduire de 25 % la résistance mécanique d'un béton après cuisson et qu'il est pratiquement impossible d'utiliser un béton contenant trop peu d'eau. Il faut toujours se préserver de la tentation qui consiste à préparer un béton plus « mouillé » dans le but de le rendre plus facilement moulable.

#### **II.2.1.4.4.Mise en place [35]**

Lorsque l'on doit couler les bétons contre les matériaux poreux tels que les briques isolantes réfractaires ou blocs isolants, il est nécessaire d'étancher au préalable la surface de ces matériaux (papier huilé) ou de l'humidifier suffisamment afin d'éviter qu'ils n'absorbent l'eau du béton.

#### **II.2.1.4.5.Mise en place par moulage [35]**

Les moules ou coffrages utilisés peuvent être en bois ou en métal. Il est essentiel de les huiler ou les graisser soigneusement afin de faciliter le démoulage. Ils doivent être remplis de manière adéquate en utilisant des vibrations telles que le tringlage, ou d'autres actions similaires, pour obtenir une densité uniforme, éliminer les poches d'air ou les vides, et garantir une structure homogène et résistante.

La plupart des bétons peuvent être mis en place en les compactant avec une truelle ou une bêche. Cependant, pour les bétons plus légers, il est préférable d'utiliser un morceau de bois de section 25 x 50, 50 x 50 ou 50 x 100 mm. Pour les bétons plus denses, l'utilisation d'une aiguille vibrante d'un diamètre de 19 ou 25 mm est plus efficace.

Il est important de limiter la quantité de béton préparée de manière à pouvoir le mettre en place dans les 15 minutes suivant le début de la préparation. Il est déconseillé de chercher à obtenir une finition de surface trop lisse en utilisant la truelle. En effet, un excès de travail de finition peut entraîner la migration des particules fines vers la surface, rendant celle-ci imperméable et réduisant ainsi sa capacité de séchage une fois la prise terminée. De plus, cela peut entraîner une surface poussiéreuse lors de la mise en service de l'installation, voire

provoquer, dans certains cas, un écaillage ou une formation de croûte à la surface avant la cuisson du béton.

En résumé, pour obtenir des pièces de qualité, il est recommandé d'utiliser de petites préparations de béton, de limiter la quantité d'eau utilisée, de le mettre en place rapidement et de laisser la surface brute. Une bonne répartition des joints de dilatation permettra de déterminer des volumes de préparation appropriés.

#### **II.2.1.4.6. Mise en place par projection [35]**

Il est également possible de mettre en place des bétons à l'aide de méthodes pneumatiques. Cette technique est largement utilisée en raison de ses nombreux avantages, notamment lorsqu'il est nécessaire de transporter de grandes quantités de béton à travers des voies d'accès de petites dimensions. Par exemple, le béton peut être chargé sur une aire appropriée, éloignée du point d'accès, puis acheminé jusqu'à l'emplacement de coulage à l'aide d'un tuyau. Les lances pneumatiques sont de deux types : sèches et humides. Dans le cas d'une lance sèche, l'ajout d'eau se fait au niveau de la buse. Cependant, il est recommandé de pré-humidifier le matériau réfractaire afin de réduire les rebonds et les poussières. Dans le cas d'une lance humide, le mélange eau-réfractaire est effectué dans une chambre de préparation, puis projeté dans la lance à l'aide d'air comprimé.

Cette méthode est particulièrement adaptée à :

- De petites réalisations pour lesquelles l'utilisation d'un équipement de projection n'est pas absolument nécessaire.
- L'isolation de surfaces de formes irrégulières et complexes (profilés en acier), les endroits présentant de faibles rayons de courbure et en particulier ceux comportant de nombreuses ouvertures.
- Les applications dans des espaces restreints où l'utilisation d'une lance pneumatique est difficile.

Un autre facteur à prendre en compte dans le choix de la méthode est le phénomène de "rebond", qui correspond aux pertes associées au système de projection à la lance. Ces pertes varient considérablement en fonction de la position dans laquelle l'application est effectuée. La projection à la lance nécessite une plus grande quantité de béton, mais permet un temps de mise en œuvre réduit. En revanche, l'application à la truelle génère peu de pertes, mais demande plus de temps.

#### **II.2.1.4.7. Application à la truelle [35]**

Dans le cas de l'application à la truelle des bétons réfractaires, le mélange doit avoir la même consistance que pour toute autre méthode d'application. La quantité d'eau déterminée par le test de "la boule dans la main" est généralement idéale pour les applications à la truelle. Cette quantité peut être facilement ajustée en fonction de l'avancement des travaux et adaptée aux préférences de l'ouvrier chargé de l'application. Il ne faut pas ajouter d'eau supplémentaire à un mélange qui commence à durcir pendant la pause. Si le problème persiste, il faudra préparer des quantités de mélange plus petites.

#### **II.2.1.4.8. Prise [35]**

Il est important d'éviter les températures élevées ou basses pendant la prise hydraulique du béton. Il est essentiel que la température du mélange sec et de l'eau de gâchage soit comprise entre 16 et 21 °C. Pour certaines applications impliquant des bétons à faible teneur en oxyde de fer, il peut être souhaitable de travailler à des températures de mélange, d'ambiance et de prise comprises entre 21 et 32 °C afin d'éviter un écaillage excessif lors de la première chauffe. Des précautions spéciales doivent être prises lorsque la température ambiante est inférieure à 4,5 °C ou supérieure à 32 °C. Les basses températures ont tendance à retarder la prise du béton. Par exemple, il est courant qu'à une température légèrement supérieure à celle du gel, le béton mette deux fois plus de temps à prendre et à pouvoir être démoulé. Si le béton a été stocké à des températures inférieures au gel, il est recommandé d'utiliser de l'eau de gâchage tiède ou, mieux encore, de placer le béton pendant au moins 24 heures dans un endroit chaud avant de procéder au mélange. Sinon, des cristaux de glace peuvent se former dans le mélange, ce qui rendra la mise en œuvre difficile. En général, le béton doit toujours être mis en place au-dessus de la température de gel. Des températures supérieures à 32 °C accélèrent le temps de prise. Cependant, il est important d'éviter de stocker le béton en plein soleil ou près d'une source de chaleur. Si, au moment de la préparation, le béton est trop chaud, il est recommandé d'utiliser de l'eau fraîche pour abaisser la température du mélange afin de disposer d'un temps suffisant pour la mise en place avant le début de la prise.

Pour les bétons réfractaires, maintenir une ambiance humide permet d'obtenir une résistance mécanique optimale. La surface du béton frais doit être maintenue dans une ambiance humide, soit par une fine pulvérisation d'eau, soit en la recouvrant entièrement de toiles humides. Ces toiles ne doivent pas être en contact direct avec le béton, mais placées à environ 25 mm au-dessus de sa surface. Cette ambiance humide doit être maintenue pendant 24

heures, la prise normale du béton intervenant 8 à 10 heures après le début de la préparation. La prise peut également s'effectuer sous la protection d'un film à base de résine déposé par projection. Cette méthode n'affecte pas le temps de prise. Le film protecteur déposé à la surface du béton le rend imperméable, empêchant ainsi l'évaporation de l'humidité absorbée par le liant à l'intérieur du béton. Cette méthode est la plus économique lorsque de grandes surfaces sont concernées et lorsque l'épaisseur du revêtement n'excède pas 300 mm. Après la prise, le béton peut être exposé immédiatement à la température ou continuer à sécher à l'air, mais plus le séchage à l'air du béton est long avant l'exposition à la température, meilleure sera sa résistance. Au bout de quelques jours, l'effet du séchage à l'air sur la résistance devient minime.

#### **II.2.1.4.9.Séchage et cuisson [35]**

Avant d'être mis en service, tout ouvrage en béton réfractaire doit être soigneusement séché. Le séchage ne doit pas être trop rapide pour les raisons suivantes :

Les bétons réfractaires ont une porosité plus faible que celle des briques ou des réfractaires plastiques de qualité comparable, ce qui rend plus difficile l'élimination de l'eau lorsqu'ils sont chauffés.

Un chauffage trop rapide peut provoquer la formation de fissures, qui apparaîtront d'abord du côté froid puis se propageront à travers le revêtement jusqu'au côté chaud. Il est préférable d'augmenter lentement la température, à raison de 50 °C par heure, jusqu'à 110 °C, puis de la maintenir à cette valeur pendant au moins 18 à 24 heures afin de permettre une élimination progressive de l'eau contenue dans le béton. Les éléments de grande taille ou d'épaisseur importante nécessiteront un séchage particulièrement soigneux et plus long.

Pour la cuisson, il est recommandé d'augmenter progressivement la température jusqu'à 550-600 °C, à raison de 2 heures par tranche de 25 mm d'épaisseur (par exemple, 12 heures pour une épaisseur de 150 mm), puis de maintenir cette température pendant 8 heures. Ensuite, la température peut être augmentée d'environ 50 °C par heure jusqu'à atteindre la température de fonctionnement.

#### **II.2.1.4.10.Conditions de stockage [35]**

Pour éviter l'absorption d'humidité, les bétons réfractaires doivent être entreposés dans un local frais, sec et bien ventilé. Dans de telles conditions, la résistance mécanique des bétons ne sera affectée que d'environ 10 % après un an. Cependant, en cas de stockage prolongé, il

sera nécessaire d'effectuer des essais de résistance mécanique après séchage avant de les utiliser.

L'exposition à l'humidité entraînera la formation de conglomérats solides qui réduiront l'efficacité des liants. Dans la mesure du possible, les sacs doivent être entreposés sous des housses plastiques à l'intérieur d'un bâtiment. Si les matériaux doivent être stockés à l'extérieur, ils doivent être placés sur une plate-forme ventilée, séparés du sol et protégés par une bâche étanche pour empêcher tout contact avec l'eau. Si, toutefois, les sacs de béton doivent être posés directement sur le sol, il est nécessaire d'interposer une feuille de plastique pour les isoler de l'humidité du sol.

**NB** : Les caractéristiques techniques mentionnées ici sont des valeurs typiques obtenues selon des méthodes de test traditionnelles et peuvent donc varier en fonction du processus de fabrication. Ces valeurs sont fournies à titre indicatif et peuvent être modifiées sans préavis.

### **II.3. Différents Essais effectués sur le béton réfractaire [36]**

Un béton est un matériau composite principalement constitué de matériaux minéraux. Il est composé d'agrégats, de ciment, d'eau et d'adjuvants. C'est le matériau de construction le plus couramment utilisé de nos jours car il est économique et très malléable. En effet, il existe de nombreuses recettes pour fabriquer du béton, adaptées aux différents types de constructions. Selon les besoins, le béton peut être plus ou moins résistant, résistant aux chocs thermiques, perméable ou durable.

L'évaluation des propriétés de résistance et de durabilité d'un béton nécessite une approche méthodique. Il est essentiel de caractériser et de contrôler en laboratoire sa composition et ses propriétés afin de prédire son comportement au fil du temps. Les propriétés d'un béton destiné au génie civil ne seront pas les mêmes que celles d'un béton destiné au bâtiment, il est donc important de les déterminer spécifiquement.

Selon la société Ginger CEBTP, leader en France dans le domaine de l'ingénierie des sols, des essais sur les matériaux et de la santé des ouvrages et des bâtiments, elle dispose de laboratoires spécialisés pour caractériser les bétons et leurs composants (agrégats, ciments, adjuvants, eau de gâchage, etc.) afin d'en déterminer les propriétés. Les équipes de Ginger CEBTP agissent en tant que bureau d'études et accompagnent tous les acteurs de la construction, du projet le plus simple aux projets complexes. Elles prennent en charge les matériaux, réalisent des prélèvements et des essais sur des échantillons nécessaires à l'analyse.

Les laboratoires spécialisés de Ginger CEBTP sont capables de réaliser divers types d'essais sur différents matériaux, tels que les essais sur les peintures, les résines, les colles, les bois, les sols, les pierres ou les granulats, les eaux, les essais métallographiques et les matériaux réfractaires, etc. La gamme d'essais proposée par Ginger CEBTP est large, ce qui permet de tester toutes les caractéristiques des produits. Selon cette société, de nombreux essais sont effectués sur les bétons réfractaires et autres bétons classiques à base de ciment notamment:

### ➤ **Essais à l'état frais**

- Essai d'affaissement ou d'étalement
- Masse volumique
- Teneur en air occlus

### ➤ **Essais mécaniques**

- Résistance à la compression
- Résistance à la traction
- Résistance à la flexion
- Module d'élasticité et coefficient de Poisson
- Essais de retrait et de fluage
- Loi de comportement mécanique

### ➤ **Essais de durabilité**

- Résistance au gel (ce phénomène n'existe pas à Goma)
- Retrait et gonflement
- Absorption
- Dilatation thermique
- Ecaillage
- Perméabilité à l'eau et aux gaz

- Carbonatation accélérée
- Réaction vis-à-vis de l'alcali-réaction et de la réaction sulfatique interne

➤ **Essais chimiques et microstructuraux**

- Analyse des eaux
- Dosage en ciment
- Analyse de constitution
- Diffusion des ions chlorures
- Détection des composés d'altération
- Identification des produits organiques, ...

**N.B :** La société Ginger CEBTP est également équipé de laboratoires chimiques afin de quantifier tous les constituants du béton et de détecter toute maladie touchant le matériau ou un de ses éléments.

Dans la logique de ce qui précède, ce que l'œil humain ne peut voir directement peut être visible d'autres manières.

Ainsi la microstructure et les essais chimique permettent de retrouver la constitution initiale de matériau, mais aussi den quantifier les composants.

Par ce type d'examen il est possible d'extraire de nombreuses propriétés afin d'identifier d'éventuelles pathologies ou de retracer la formulation des matériaux.

### **Les essais sur constituants**

La performance d'un béton dépend avant tout de la qualité de ses constituants. Pouvoir la mesurer et l'évaluer pour chaque matériau permet d'optimiser l'analyse et d'affiner les propriétés globales d'un béton. Ginger CEBTP prend en charge tous ces essais, nous avons:

#### ➤ **Essais sur ciments**

- Temps de prise
- Stabilité à la chaud
- Résistance à la flexion et à la compression
- Masse volumique
- Retrait ou gonflement
- Chaleur d'hydratation

#### ➤ **Essais sur granulats**

- Sur sables : masse volumique, friabilité, équivalent de sable
- Sur gravillons : masse volumique, coefficient d'aplatissement, Los Angeles, sensibilité au gel, fragmentation dynamique
- Sur enrochements : masse volumique, résistance au gel/dégel (les phénomènes gel/dégel n'existent pas à Goma)

#### ➤ **Essais sur additions**

- Indice d'activité
- Finesse
- Surface spécifique Blaine
- Besoin en eau

### CHAPITRE III : CONCLUSION GÉNÉRALE

En conclusion, notre travail de recherche sur le béton réfractaire et sa pertinence pour la réparation des chaussées de la ville de Goma a permis de mettre en évidence l'importance de ce matériau dans le contexte spécifique de notre région. Nous avons constaté un manque de connaissances approfondies sur les matériaux réfractaires, ainsi que des lacunes dans les études préalables et la mise en œuvre des solutions de réparation des chaussées.

En nous focalisant sur le béton réfractaire, nous avons souligné sa capacité à résister à des températures élevées, sa stabilité, sa résistance à la corrosion et ses propriétés mécaniques avancées. Ces caractéristiques en font un matériau adapté pour faire face aux conditions agressives auxquelles sont exposées les chaussées de Goma, telles que les intempéries, les variations thermiques et le trafic automobile.

En menant cette étude théorique, nous avons également cherché à sensibiliser la population de Goma et les étudiants en génie civil et en géologie à l'importance de connaître et d'utiliser des matériaux appropriés dans la construction et la réparation des infrastructures routières. Nous espérons que notre travail contribuera à améliorer les pratiques de construction, à réduire les dépenses inutiles et à prévenir les accidents causés par la dégradation des chaussées.

En poursuivant notre formation dans le domaine du génie civil, nous serons en mesure de mieux comprendre les défis spécifiques auxquels sont confrontées les chaussées de Goma et de proposer des solutions innovantes et durables pour leur réparation et leur entretien. Nous sommes conscients que notre travail constitue une étape vers une meilleure compréhension des bétons réfractaires et de leur application dans notre contexte local, et nous encourageons les futurs chercheurs et ingénieurs à approfondir cette voie de recherche.

En conclusion, notre étude sur le béton réfractaire et son utilisation dans la réparation des chaussées de Goma vise à contribuer à l'amélioration des infrastructures routières de notre ville. Nous sommes convaincus que l'utilisation de matériaux adaptés et de techniques de construction appropriées est essentielle pour assurer la durabilité et la sécurité de nos routes.

## Bibliographie

- [1] FEBELCEM: Federation de l'industrie cimentiere Belge, «LA ROUTE EN BETON: UNE SOLUTION ECONOMIQUE ET DE QUALITE,» [En ligne]. Available: [www.febelcem.be](http://www.febelcem.be). [Accès le 18 Octobre 2021].
- [2] B. M. Buno Caillard, «GRAND GUIDE DE CONSTRUCTION DES MACONNERIE,» 11 avril 2017.
- [3] F. Thummen, Propriété mécanique et durée de vie de béton réfractaires, Thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées, Université de Lyon, N° d'ordre: 04 ISAL 0027, vol. 165 page, Lyon, 2004.
- [4] S. Souhila, Mémoire de fin d'étude de Master 2 en Génie Civil: Elaboration et caracterisation d'un béton réfractaire fibré(A base du déchet réfractaire), Option Ingénierie des Matériaux de Construction, Université AKLI MOAND OULHADJE-BOUIRA, Bourmedes, Année Universitaire 2015-2016.
- [5] M. G. KAKROUDI, Thèse de doctorat: (Comportement thermodynamique en traction de béton réfractaire:influence de la nature des agregats et de l'histoire thermique ), Université de LIMOGES, Discipline/Specialité : Matériaux Céramique et Traitement de surface, Limoges, le 27 juin 2007.
- [6] F. NGAPGUE, Cours de physique et technologie du béton grâce, cours dispensé en G3 GC Technofie à l'Université Libre des Pays des Grands Lacs/Goma, année académique 2020-2021.
- [7] B. Khaled, Mémoir Magister: Elaboration et caractérisation thermomécanique des mortiers à base d'ajouts de déchets de briques réfractaires, Université M'Hamed Bougara de Bourmedes, 2014, 109 page, Bourmedes.
- [8] J. Poirier, Les ceramiques réfractaires l'élaboration aux propriétés d'emploi, Université d'Orléans, 28-42 page, Paris, 2011.
- [9] J.Poirier, Matériaux réfractaire, in Propriétés et application des céramiques, 2011 éd., H.S.E.Ltd.
- [10] K. Mostafa, Thèse de doctorat, option mécanique de precision: Elaboration et Caractérisation thermomécanique de réfractaires à base de Kaolin dd3, Université Ferhat Abbas-Sétif, vol. 175 page, Sétif, 2008.
- [11] J. F. Georges Dreux, Nouveau guide du béton et de ses constutnants, 8e, Éd., Eyrolles, 1998.
- [12] A. Mazzoni, Thèse de doctorat: ( Comportement thermomécanique d'un béton réfractaire: effets du renforcement par des fibres minérales), Université de Toulouse 3, vol. 248 page, 2009.
- [13] P. Pichat, «Le béton,un produit chimique composite,» juin 2011. [En ligne]. Available: <https://fr.m.wikipedia.org>. [Accès le 24 9 2021].
- [14] IFSTTAR, «Institution Francaise des Sciences et Technologies des Transports de l'Aménagement et des Réseaux(IFSTAR),Files: ITRD,» vol. 37, p. 4, 21 11 2010.
- [15] A. Briebach, A review of refractory hydraulic cements, Trans Brit. Ceram.Soc., vol. 71, pp. 153-

158.

- [16] S. M. A. Capmas, The Behaviour of CA/CA2 cements during hydration and thermal treatment, Proceeding Uniterc, vol. 97, pp. 1273-1282.
- [17] F. S. C. Parr, The impact of calcium Aluminate cement hydration upon the properties of refractory castable, Journal of the Technical Association of Refractories of Japan, vol. 25, 2005, pp. 78-88.
- [18] J. H. Chester, Refractories Production and properties, London: The Iron and Steel Institute, 1973, pp. 77-80.
- [19] B. Myhre, Hot strength and bond-phase reactions in low and ultra low-cement castables, UNITECR 1993 Proc. biennial worldwide conf. on refractories, San Paulo, 1993, pp. 583-594.
- [20] Z. L. a. S. P. S. M. J. Aquino, Mechanical Properties of the Aggregate and Cement Interface, Advanced Cement based Materials, 1995, pp. 2011-249.
- [21] H. T. N. H. A. Shimpo, Mechanical properties of monolithic refractories with coarse aggregates and reliability of the three-point bending test using a standard brick shape test piece, Journal of the Technical Association of Refractories, 2004, pp. 211-249.
- [22] S. Banerjee, Monolithic Refractories A comprehensive handbook, The American Ceramic Society, 1998, pp. 1-6.
- [23] H. S. W. E. Lee, Influence of microstructure on refractories corrosion, Ceram.Int., vol. 28, 2002, pp. 478-493.
- [24] C. C. Furnas, Grading aggregates, mathematical relations for beds of broken solids of maximum density, Ind. Eng. Chem, vol. 23, pp. 1052-1058.
- [25] J. A. A. H. M. Andreasen, Uber die beziehung zwisch kornabstufung und zwischenraum in produkten aus losen kornern( mit einigen experimenten), Kolloid Z., vol. 50, pp. 217-288.
- [26] J. E. F. D. R. Dinger, Particle Packing\_II: Review of packing of polydisperse particle systems, Intercam, vol. 41, 1992, pp. 95-97.
- [27] K. M. P. a. J. H. Sharo, Refractory calcium aluminate cements, Transaction and Journal of the Brit. Ceramic Society, vol. 41, 1982, pp. 35-42.
- [28] B. M. a. B. Sandberg, The Use of microsilica in refractory castables, Taikabutsu Overseas, vol. 19, 1999, pp. 7-13.
- [29] A. C401, Standard classification of alumina and alumina-silicate castable refractories, Annual book of ASTM standard, vol. 15.01..
- [30] M. Ishikawa, Refractory castables, Taikabutsu Overseas, vol. 19, 1999, pp. 7-13.
- [31] Equipe Technique de Holicem, «GUIDE PRATIQUE: Concevoir et mettre en oeuvre des bétons durables,» 19 Aout 2019. [En ligne]. [Accès le 2 Décembre 2021].
- [32] D. R. H. J. Michael F. Ashy, Matériaux: Microstructures et procédés de mise en oeuvre, Paris: Dunod, 2014, p. 180 pages.

- [33] M. DUSQUESNOY, «COMMENT FAIRE DU BETON REFRACTAIRE?,» 6 juin 2014. [En ligne]. Available: <https://www.youtube.com/channel/UCftx>.
- [34] FILIALE EQIOM DU GROUPE CRH DES ACTEUR MAJEUR DANS LES MATERIAUX DE CONSTRUCTION DE CIMENTS, GRANULATS ET DE BETON VALORISATION DES DECHETS , [En ligne]. Available: [www.eqiom.com](http://www.eqiom.com).
- [35] PROSIREF([www.prosiref.com](http://www.prosiref.com)), [En ligne]. Available: [www.prosiref.com](http://www.prosiref.com). [Accès le 20 Octobre 2021].
- [36] Ginger CEBTP, «Etude et essais sur les bétons,» 14 Janvier 2016. [En ligne]. Available: [www.ginger-cebtp.com](http://www.ginger-cebtp.com). [Accès le 20 Octobre 2021].