

Etude Et Essai De Fabrication D'un Béton Géopolymère A Base Des Matériaux Locaux Qui Résiste A Une Température Elevée (Réfractaire)

RAKOTOARINDRIAKA Solofaly Philbert¹, RAKOTOARISAMBATRA Bertin Chrisnah², RAKOTOSAONA Rijalalaina¹, RANAIVONIARIVO Velomanantsoa Gabriely¹, RATSIMBAZAFY Hery Mikaela^{1,3}, KOERA Rasoloniaina Antoine¹, RANDRIANARINIRINA Endson Zozime^{1,4}.

¹Ecole Doctorale en Sciences et Techniques de l'Ingénierie et de l'Innovation

²Université d'Antananarivo, Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo, Mention Science et Ingénierie des Matériaux

³Centre National de Recherches Industrielle et Technologique, Département Matériaux et Génie Civil

⁴Office des Mines Nationales et des Industries Stratégiques

Correspondant : r.solofaly@gmail.com



Résumé – Pour minimiser l'impact négatif sur l'environnement lors de la fabrication du ciment, l'une des solutions consiste à remplacer partiellement, voire totalement, le ciment standard par une nouvelle génération de liants minéraux connus sous le nom de ciments géopolymères, qui présentent des propriétés similaires aux ciments classiques. Ces liants sont obtenus par l'activation alcaline de matériaux siliceux ou aluminosilicates.

Depuis la découverte des géopolymères, cette nouvelle génération de matériaux trouve des applications dans tous les domaines de l'industrie et du génie civil. En plus de leurs bonnes performances mécaniques, les bétons géopolymères résistent aux hautes températures. L'objectif de ce travail est de valoriser les matières premières locales telles que la bauxite, le kaolin et la cendre de balle de riz, et de formuler un béton géopolymère capable de supporter des températures élevées, grâce à une nouvelle formulation. Nous avons synthétisé la cendre de balle de riz et une solution de soude pour obtenir le liant géopolymère. L'ajout de bauxite calcinée ou de métakaolin au béton, avec la cendre de balle de riz, assure la réfractarité.

Au cours de cette étude, de nombreux essais ont été effectués pour déterminer si les caractéristiques des bétons ainsi produits conviennent exactement à nos objectifs. Les valeurs de résistance à la compression avant traitement thermique atteignent 12,56 MPa en 7 jours pour le béton-MK et 11,02 MPa en 7 jours pour le béton-BX, tandis que, après traitement thermique à 1000°C, elles sont de 10,04 MPa pour le béton-MK et de 8,17 MPa pour le béton-BX.

On peut affirmer que ces bétons offrent les meilleures performances thermiques et mécaniques, et que l'utilisation du liant géopolymère dans ces bétons contribue à réduire les émissions de dioxyde de carbone.

Mots clés – Bétons, Géopolymères, Température Elevée, Bauxite Calcinée, Métakaolin, Silicate De Soude, Cendre De Balle De Riz.

Abstract – To minimize the negative impact on the environment during cement manufacturing, one solution is to partially or even completely replace standard cement with a new generation of mineral binders known as geopolymer cements, which possess properties similar to traditional cements. These binders are obtained through the alkaline activation of siliceous or aluminosilicate materials.

Since the discovery of geopolymers, this new generation of materials has found applications in all areas of industry and civil engineering. In addition to their good mechanical performance, geopolymer concretes resist high temperatures. The objective of this work is to valorize local raw materials such as bauxite, kaolin, and rice husk ash and formulate a geopolymer concrete capable of withstanding high temperatures, accompanied by a new formulation. Rice husk ash and sodium hydroxide were synthesized to obtain the geopolymer binder. The addition of calcined bauxite or metakaolin to the concrete, along with rice husk ash, ensures refractoriness.

During this study, numerous tests were conducted to determine if the characteristics of the produced concretes precisely meet our objectives. The compressive strength values before baking reach 12.56 MPa in 7 days for BÉTON-MK and 11.02 MPa in 7 days for BÉTON-BX, as well as 10.04 MPa for BÉTON-MK and 8.17 MPa for BÉTON-BX after baking at 1000°C.

It can be affirmed that these concretes offer the best thermal and mechanical performances, and the use of the geopolymer binder in these concretes leads to reductions in carbon dioxide emissions.

Keywords – Concretes, Geopolymers, High Temperature, Calcined Bauxite, Metakaolin, Soda Silicate, Rice Husk Ash.

I. INTRODUCTION

Madagascar est l'un des pays qui possèdent d'importantes quantités de matières premières, telles que l'argile, la bauxite, le kaolin, ainsi que des résidus agricoles comme la balle de riz, offrant ainsi un potentiel significatif pour le développement du pays.

Les matériaux géopolymères présentent un grand nombre de propriétés qui dépendent des matières premières utilisées. Ces matériaux résistant au feu, aux acides, ont une bonne résistance mécanique et peuvent avoir un pouvoir d'isolation thermique ou phonique.

Les matériaux réfractaires appliqués aux moules de fusion ou aux poches de coulée de métaux en fusion nécessitent des propriétés supplémentaires par rapport à ceux destinée aux simples revêtements des fours. Leurs résistances aux effets thermomécaniques, aux attaques chimiques, aux chocs thermiques et aux pénétrations des phases étrangères dans leurs structures doivent être supérieures.

Dans les pays développés, les matériaux réfractaires sont les plus proposés pour la fabrication des pièces de fusion dans les fonderies.

Madagascar présente un manque des matériels ainsi que les matériaux finis destinés à la fabrication de matériau réfractaire. Cela est dû à l'absence de ciment réfractaire alumineux sur le marché. Le principal liant à utiliser pour sa réalisation est le ciment où la production nécessite beaucoup d'énergies (empreinte carbone très élevée).

Ainsi, il convient donc de trouver des alternatives du ciment ordinaire et construire avec des matériaux à faible empreinte carbone. D'où, la recherche de nouvelles alternatives du ciment portland.

Les études faites par le célèbre français Davidovits en 1970 ont montré que le liant géopolymère pourrait être utilisé pour la synthèse de bétons.

C'est dans ce cadre que nous avons avançons le thème de notre article intitulé : « Etude et Essai de Fabrication d'un béton géopolymère à Base des matériaux locaux qui résiste à une température élevée (réfractaire) »

II. MATERIELS ET METHODES

Pour élaborer et fabriquer le béton dans notre étude, les matériaux que nous avons sélectionnés sont :

- Du kaolin (source d'aluminosilicate et de métakaolin),
- De la silice obtenue par calcination de balle de riz,
- De la bauxite calcinée,
- Du silicate de soude,
- Du gravillon,
- Du sable,
- De l'eau de JIRAMA.

2.1. Matériels

Nous exposons ci-après les matériels utilisés pour la réalisation de cette étude.

Tableau Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document..1: Matériels et leurs utilisations

MATERIELS	UTILISATION
Four	Calcination des poudres (kaolin, bauxite) et calcination des éprouvettes prismatiques
Broyeur à boulets	Broyage des poudres (kaolin, bauxite, Cendre de balle du riz)
Marteau	Concassage de la bauxite et du gravier
Tamis	Tamissage des poudres (0,4 mm) et des granulats [sable (0/5), graviers (5/8)]
Tamiseuse	Machine à utiliser pour l'analyse granulométrique
Ramassette	Ramassage des poudres dans la barquette
Barquette	Lieu ou on met les constituants
Air comprimé	Nettoyage de la barquette
X-Ray Fluorescence	Pour l'analyse chimique
Balance	Pesage des constituants
Moule prismatique	Moulage du béton
Malaxeur	Malaxage des constituants
Tables vibrantes	Vibrage du béton
Pied à coulisse	Mesurage des éprouvettes prismatiques
Machine d'essai mécanique	Essai de flexion et compression

2.2. Préparation des matières premières

2.2.1. Préparation du kaolin

Le kaolin, que nous avons utilisé durant notre étude a été acheté auprès de PROCHIMAD et est déjà broyé de classements granulométrique 40µm.



Figure Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document..1 : Le kaolin d'Analabe

Pour avoir le métakaolin, il est nécessaire de faire la calcination dans un un four de calcination à 750°C pendant 2 heures puis on le laisse refroidir le kaolin.

Le but de cette calcination est d'avoir le métakaolin dont la silice et l'alumine deviennent spécialement réactives. Voici la réaction :



(Erreur ! Il n'y a pas de texte

répondant à ce style dans ce document..1)

2.2.2. Préparation de la cendre de balle de riz

Cette préparation a pour objectif d'obtenir une cendre riche en silice fines actives. Pour atteindre cet objectif, on doit faire donc toutes les opérations décrites suivantes :

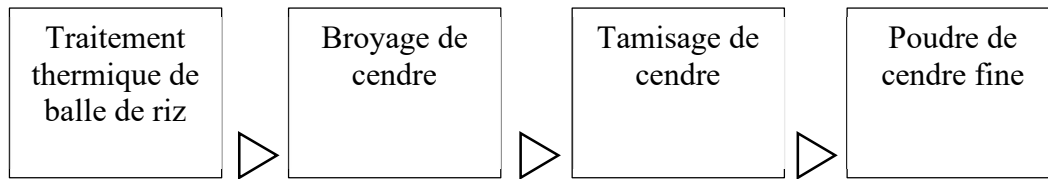


Figure Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document..2: Etapes de fabrication de CBR

2.2.2.1. Traitement thermique de la balle de riz

Les cendres de balle de riz sont obtenues par la calcination de la balle de riz à l'ordre de 600°C pour avoir des silices fines actives.



Figure Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document..3: Incinérateur pour le traitement thermique des balles de riz

Une fois l'incinérateur est prêt en introduisant la quantité de la balle de riz, la calcination peut s'effectuer.

Pendant qu'on a fait l'expérience, il y a deux étapes afin d'obtenir des cendres riches en silice :

- 1^{ère} étape : carbonisation : La balle de riz devient noirâtre. Cette étape est faite pendant 18 heures



Figure Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document..4: Etape de carbonisation

- 2^{ème} étape : combustion lente : les produits obtenus dans la 1^{ère} étape se transforme progressivement en cendre de couleur gris qui a une silice amorphe. Cette étape est aussi faite pendant 18 heures.



Figure Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document..5: Obtention de cendre de couleur gris

2.2.2.2. Broyage de la cendre de balles de riz

Le broyage a pour but de mettre en poudre la cendre de balle de riz pour qu'elle soit très réactive. Dans notre étude, on utilise le broyeur à boulet pour l'activation mécanique.

Le processus de broyage se fait comme suit :

- Les cendres de balle de riz et les boules sont introduites dans le broyeur,
- On ferme le broyeur et on attend 6h de temps du broyage.

Après le broyage, on a la poudre de cendre qui est sur la photo ci-dessous :



Figure Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document..6 : Cendre de balle de riz broyé

2.2.2.3. Tamisage

Le but de cette opération c'est d'éliminer les impuretés, c'est-à-dire les cendres de balle de riz incuits et surcuits.



Figure Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document..7: **Tamisage de la cendre de balle de riz**

Nous avons utilisé le tamis normalisé de diamètre d'ouverture 0,4mm, pour obtenir une silice fine et réactive.

2.2.3. Préparation de la bauxite

Pour la préparation de la bauxite, on procède à l'activation thermique et mécanique.

- L'activation thermique de la bauxite sert à rendre l'alumine très réactive ;
- L'activation mécanique de la bauxite consiste à broyer avec un broyeur à boulets le minerai afin d'avoir de la bauxite en poudre ; après on passe au tamisage pour avoir une granulométrie fine ; on a utilisé un tamis de 0,4 mm.

2.2.3.1. Concassage de la bauxite

La bauxite d'Antanifotsy a la morphologie d'un minerai compact caverneux ; il est donc nécessaire de la concasser pour faciliter le broyage. On écrase la bauxite à l'aide d'un marteau pour réduire la dimension de ces grains.

2.2.3.2. Broyage

Pour rendre fine les grains de la bauxite (diamètre est égale à 0,4 mm), on a utilisé un broyeur à boulet. Le déroulement du broyage de la bauxite se fait comme suit :

- Les bauxites et les boules sont insérées dans le broyeur,
- On ferme le broyeur et on attend 6h de temps du broyage,



Figure Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document..8 : Bauxite broyée

2.2.3.3. Tamisage

Le tamisage a deux rôles bien distincts :

- Il sert à avoir les granulométries voulues selon l'utilisateur ; dans notre cas on a utilisé des tamis de diamètre 0,4 mm ;
- La plus importante, c'est que le tamisage élimine les grains ferreux que le broyeur n'arrive pas à broyer.



Figure Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document..9: Tamisage de la bauxite

2.2.3.4. Calcination de la bauxite

Pendant l'activation thermique de la bauxite, elle va subir une calcination à 750°C pendant une durée de 2 h avec une montée de température de 15°C par mn. Après on laisse se refroidir avec la température de refroidissement lent à la vitesse propre du four.



Figure Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document..10 : Obtention bauxite calcinée

2.2.4. Préparation de la soude caustique

La solution de soude caustique est utilisée en faisant réagir avec la cendre de balle de riz. La réaction entre les cendres de balle de riz et la soude donne le silicate de soude.



Figure Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document..11 : Soude caustique

2.2.4.1. Préparation du sable (0/5) et du gravier (5/8)

Le sable et le gravier qu'on utilise viennent d'Alakamisy-Fenoarivo dans la région Analamanga.

Il faut directement tamiser le sable à l'aide de tamis inférieur à 5mm.

2.2.5. Préparation de l'eau

L'eau utilisée est de l'eau potable de la JIRAMA.

III. FABRICATION DE BETON GEOPOLYMERE

L'étude a été réalisée sur des éprouvettes prismatiques de dimension L=16cm et de largeur l=4cm, hauteur h=4cm

Les étapes de fabrication se déroule comme ci-dessous

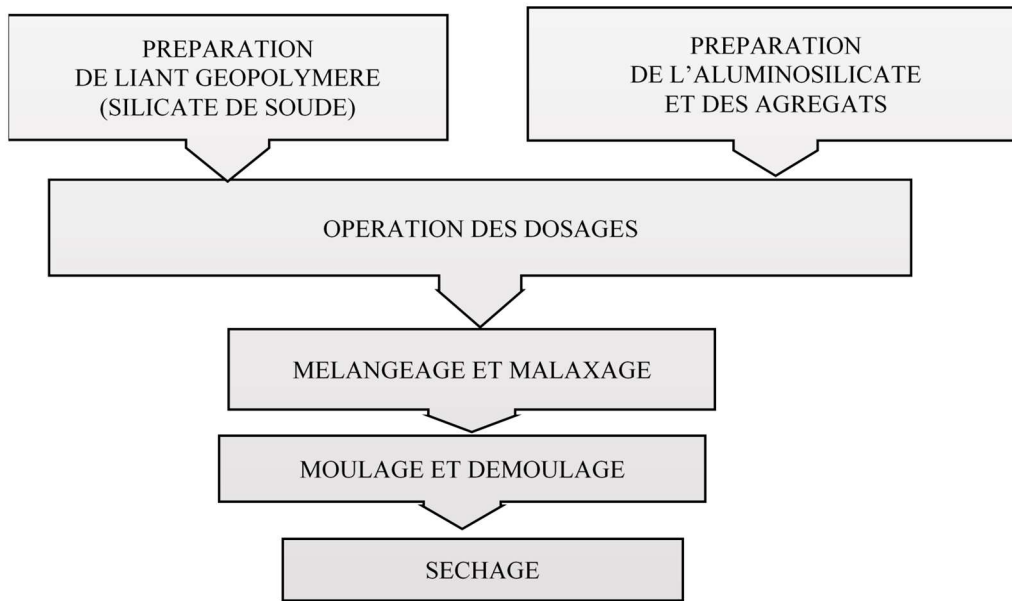


Figure Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document..12 : Processus de fabrication des éprouvettes de béton géopolymère.

3.1. Préparation de liant géopolymères (silicate de soude)

On utilise le silicate de soude pour notre liant, les matières premières utilisées sont la soude, la cendre de balle de riz et de l'eau.

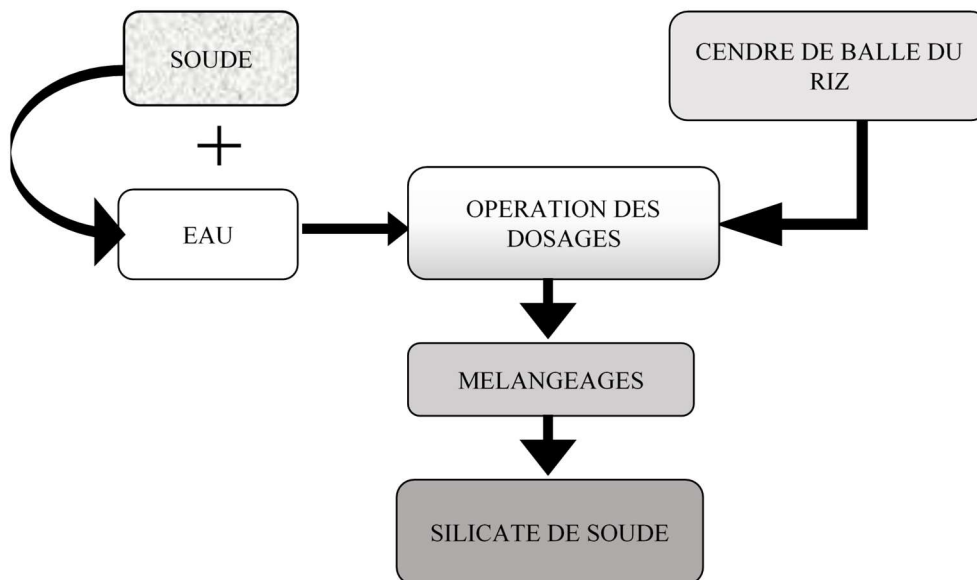


Figure Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document..13: Etapes de fabrication de silicate de soude

La synthèse du silicate de soude se fait par la réaction de la soude avec de la silice amorphe, ou plus précisément on fait rendre soluble la silice amorphe en milieu basique à basse température (de l'ordre de 100°C). On définit le module noté R_m par le rapport entre le nombre de mole de SiO_2 et Na_2O .

$$R_m = \frac{n_{SiO_2}}{n_{Na_2O}} \quad (\text{Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document..2})$$

Voici l'étape de la fabrication du silicate de soude :

3.1.1. Pesage

Le pesage est nécessaire pour la préparation de silicate de soude pour avoir un dosage précis. Nous allons peser à chaque matière première.

3.1.2. Mélangeage

Après l'opération de pesage, on verse la soude dans l'eau puis on remue. Ensuite on ajoute de la cendre de balle de riz et en mélangeant jusqu'on obtient le silicate soude plus ou moins fluide.



Figure Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document..14: Etape de fabrication de silicate de soude

3.2. Préparation de l'aluminosilicate

On doit préparer l'aluminosilicate, peser la cendre de balle du riz et la bauxite puis mélanger jusqu'on obtient un mélange homogène.



Figure Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document..15: Obtention de l'homogénéité de l'aluminosilicate

Une fois que la préparation de l'aluminosilicate est terminée ; remuer le sable et le gravillon après leur pesage. Ensuite, verser l'aluminosilicate dans les agrégats et enfin, on fait le mélangeage à sec de tous les constituants.



Figure Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document..16: Mélangeage de l'aluminosilicate avec des agrégats

Au moment où l'on obtient le mélange de l'aluminosilicate avec des agrégats, on verse l'eau de gâchage et on ajoute du liant puis mélangé à l'aide de cuillère pendant quelques minutes. Ensuite, on introduit dans le malaxeur pour obtenir bien l'homogénéité de tous les constituants.



Figure Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document..17: Mélangeage de tous les constituants

3.3. Moulage et démoulage

Le moulage est effectué dans une moule pour s'en sortir trois éprouvettes prismatiques identiques de 16cm de longueur, 4cm de largeur et 4cm de hauteur à l'aide de table vibrante. On pose sur une table vibrante pendant 60 secondes pour avoir un minimum de vide. Le démoulage se fait 24h après moulage.



Figure Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document..18: Moulage et démoulage

3.4. Séchage

Nous avons séché les compositions à l'air libre, à l'abri du soleil pendant une durée déterminée avant d'être mis à des essais mécaniques, physiques et thermiques.



Figure Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document..19: Séchage des éprouvettes

IV. RESULTATS ET DISCUSSIONS

La formulation détermine les propriétés chimiques, physiques, mécaniques et thermiques des matériaux géopolymères réfractaires à fabriquer. Nous cherchons alors à préparer un béton géopolymère qui résiste et qui est stable à des hautes températures et dont les résistances mécanique, chimique et thermique sont bonnes.

Les paramètres que nous avons variés sont :

- Rapport molaire,
- Rapport massique entre la bauxite et la cendre dans l'aluminosilicate,
- Quantité du liant,
- Rapport massique entre la quantité du sable et du gravillon

4.1. Traitement thermique à 700°C sous l'influence de la variation du rapport molaire R_m

$$R_m = \frac{n_{SiO_2}}{n_{Na_2O}} \quad (\text{Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document..3})$$

4.1.1. Paramètre de fabrication

L'étude est réalisé sur cinq formulation : $R_m = 2; 2,5 ; 3 ; 3,5 ; 4$.

On a fabriqué des éprouvettes pour chaque rapport molaire et chaque composition et on test les compositions à une température de 700°C pendant deux heures.

Dosages fixes :

- Sable = 124 g,
- Gravillon = 248 g,
- Aluminosilicate (cendre et bauxite) : 35g + 35g= 70 g,
- Eau de gâchage = 50g,
- Liants (SS) = 70 g.

4.1.2. Résistance à la compression R_c

Le tableau ci-dessous montre la résistance à la compression avant et après traitement thermique à 700°C des compositions.

Tableau Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document..2 : **Résistance à la compression en fonction de la variation R_m**

Composition	Rm	AVANT TRAITEMENT THERMIQUE	APRES TRAITEMENT THERMIQUE
		Rc en MPa	
C1	2	3,250	1,70
C2	2,5	2,831	2,61
C3	3	1,824	1,05
C4	3,5	1,329	0,68
C5	4	1,171	0,83

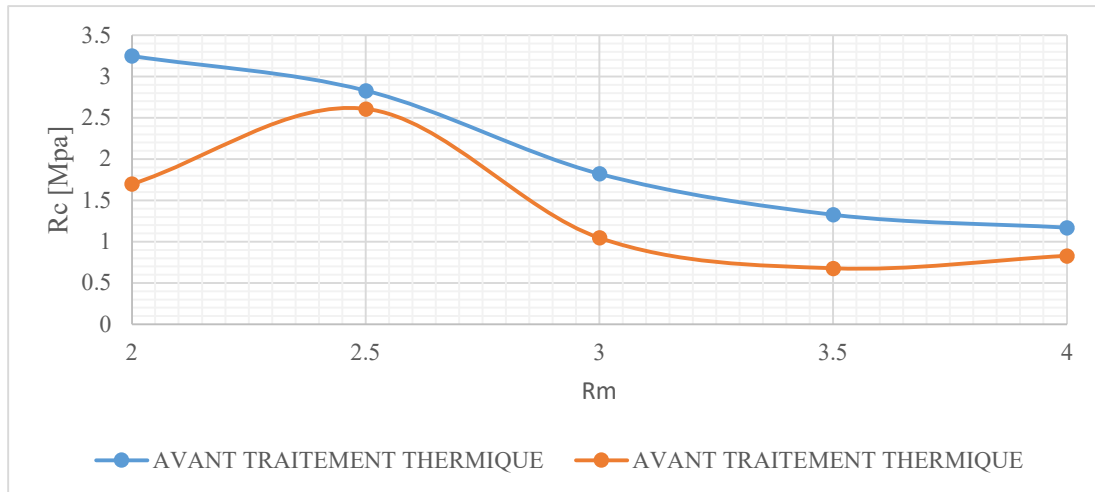


Figure Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document..20 : Variation de la résistance à la compression avant et après traitement thermique

D'après la figure ci-dessus, le rapport molaire :

- $R_m=2,5$ nous montre la meilleure résistance à la compression ($R_c = 2,8$ MPa avant traitement thermique et $2,6$ MPa après traitement thermique). C'est-à-dire que ce rapport molaire est optimum puisque la dissolution de la cendre et de la bauxite est maximale. En plus, la quantité de soude et la quantité de la silice est stabilisée dans le silicate de soude. Donc, les éprouvettes prennent un peu de changement même s'elles ont calcinées à 700°C .
- $2 \leq R_m < 2,5$, la résistance augmente mais faiblement surtout après traitement thermique, cela explique que la quantité de la silice est insuffisante ou bien la quantité de soude est en excès dans le silicate de soude, cela rend les éprouvettes en béton moins résistants ; par conséquent le liant devient faible suivant l'élévation de la température durant la période de traitement thermique à 700°C .
- $R_m > 2,5$, la résistance diminue car la quantité de soude est insuffisante pour attaquer la silice du silicate de soude, et cela entraîne une partie des aluminosilicates non dissoutes. Proprement dit donc, elle est trop faible lors du traitement thermique de l'éprouvette à 700°C .

4.2. Traitement thermique à 800°C sous l'influence de la variation du rapport massique entre la bauxite et la cendre dans l'aluminosilicate

Dans la suite de notre étude nous avons pris $R_m = 2,5$ et on varie le rapport massique R_{m1} à $0,83$; $1,21$; $1,47$; $1,80$ et $2,23$ dans l'aluminosilicate

$$R_{M1} = \frac{m_{Bx}}{m_{CBB}} \quad (\text{Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document..4})$$

Dosages fixes :

- Sable = 124 g,
- Gravillon = 248 g,
- Aluminosilicate (cendre et bauxite) : 70 g,
- Eau de gâchage = 50 g,

4.2.1. Essai physique

Les résultats des évolutions des masses et volume de béton avant et après traitement thermique à 800°C sont présentés dans le tableau suivant.

Tableau Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document..3 : Perte de masse et retrait volumique des éprouvettes sous l'effet du traitement thermique à 800°C

Comp.	Avant traitement thermique		Après traitement thermique		Perte de masse (%)	Retrait volumique (%)
	m [g]	V [cm ³]	m [g]	V [cm ³]		
C6	505	254,4	466	252,8	7,72	0,63
C7	487	256	446	256	8,42	0,00
C8	494	256	455	256	7,89	0,00
C9	507	256	463	256	8,68	0,00
C10	496	256	459	254,4	7,46	0,62

On constate d'après ces résultats qu'on a des valeurs plus ou moins constantes ; c'est-à-dire qu'il y a stabilité progressive, d'une manière presque linéaire du pourcentage de perte de masse et de la retrait volumique. On peut interpréter que la cause de cette stabilisation est due au faite que la bauxite a subi un traitement thermique à 750°C ce qui provoque un faible retrait sous l'effet du traitement thermique 800°C. On peut dire donc que le pourcentage de retrait stabilise lorsque le Rm1 augmente.

4.2.2. Essai mécanique

4.2.2.1. Résistance à la compression RC

Le tableau ci-dessous montre la résistance à la compression avant et après traitement thermique à 800°C des compositions.

Tableau Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document..4: Résistance à la compression en fonction de la variation Rm1

Comp.	Rm1	Rc avant traitement thermique	Rc après traitement thermique
		Rc[MPa]	Rc[MPa]
C6	0,83	1,38	2,35
C7	1,21	2,36	3,07
C8	1,47	1,46	2,34
C9	1,8	2,07	3,31
C10	2,23	1,32	2,68

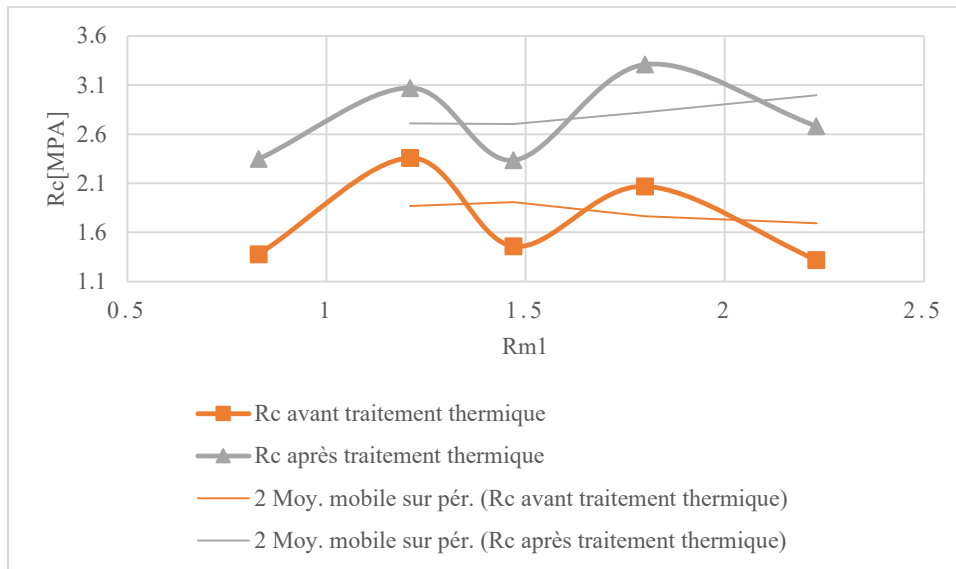


Figure Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document..21 : Variation de la résistance à la compression avant et après traitement thermique

En fixant $R_m=2,5$, la figure ci-dessus nous présente que la résistance à la compression avant et après traitement thermique varie suivant la variation de R_{m1} dans l'aluminosilicate. La meilleure résistance à la compression avant traitement thermique est $R_{m1}=1,21$, $R_c=2,36$ MPa et après traitement thermique c'est $R_{m1}=1,8$ qui a $R_c=3,31$ MPa. Donc $R_{m1} = 1,21$ est la bonne valeur avant traitement thermique, tandis que $R_{m1}=1,8$ après traitement thermique, cela signifie que le rapport massique entre la bauxite et la cendre joue un rôle très important pendant le traitement thermique de l'éprouvette.

En analysant la figure, l'allure de courbes avant traitement thermique tend vers le bas (si on augmente R_{m1} mais après traitement thermique, elles ont tendance à monter suivant la variation de R_{m1} dans l'aluminosilicate.

4.2.2.2. Résistance en traction par flexion R_f

Le tableau ci-après nous montre la résistance en traction par flexion :

Tableau Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document..5 : La résistance en traction par flexion

Comp.	R_{m1}	Rf avant traitement thermique Rf[MPa]	Rf après traitement thermique Rf[MPa]
C6	0,83	0,53	0,84
C7	1,21	0,73	0,56
C8	1,47	0,52	0,28
C9	1,8	0,69	0,84
C10	2,23	0,14	0,84

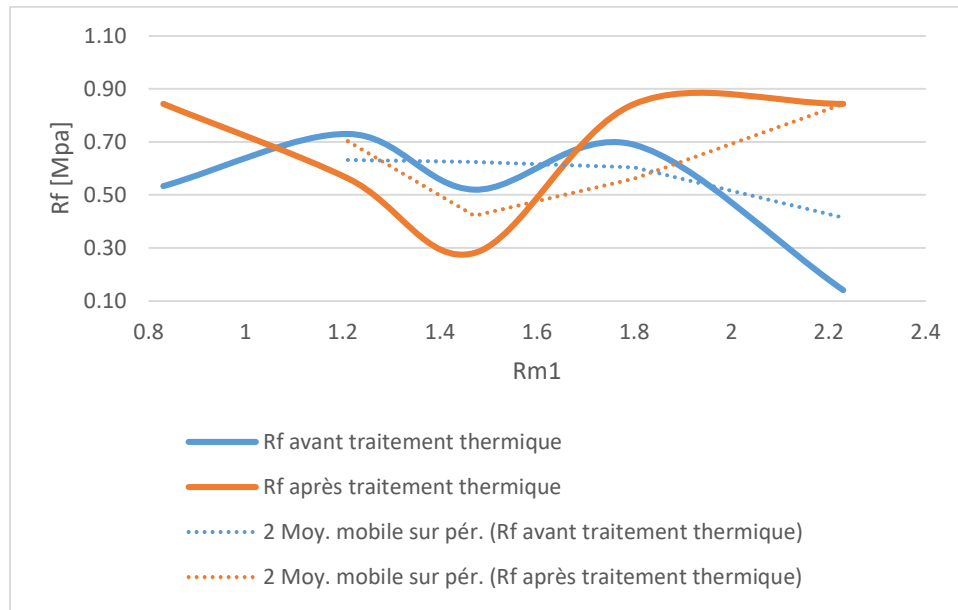


Figure Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document..22 : Variation de la résistance en traction par flexion avant et après traitement thermique

D'après cette figure, on voit la même remarque à l'interprétation aux figures de la résistance à la compression précédent. Les meilleures résistances en traction par flexion avant traitement thermique sont $R_{m1}=1,21$ à $R_f=0,73$ MPa mais après traitement thermique ce sont $R_{m1}=0,83$; $1,8$ et $2,23$ qui ont la même R_f de $0,84$ MPa. La résistance en traction par flexion varie avec l'augmentation du rapport massique R_{m1} entre la bauxite et la cendre dans l'aluminosilicate. C'est-à-dire que l'allure de courbe de tendance à donner une forme périodique ou bien sinusoïdal mais tend vers descendant suivant l'élévation du R_{m1} dans l'aluminosilicate. De même résultats après traitement thermique, mais l'allure de courbe, tendance à ascendant selon l'accroissement de R_{m1} dans l'aluminosilicate.

4.3. Traitement thermique à 900°C sous l'influence de la variation de la quantité du liant

Dans la suite de notre étude nous avons pris $R_{m1}=2,5$; $R_{m1}=1,8$ et on varie la quantité du liant à 50g ; 60g ; 80g ; 90g ; 100g dans l'aluminosilicate.

Dosages fixes :

- Sable = 124 g,
- Gravillon = 248 g,
- Aluminosilicate (cendre et bauxite) : 70 g, avec $R_{M1} = 1,8$
- Eau de gâchage = 50g.

4.3.1. Essai physique

Les résultats de variation des masses et volumes des éprouvettes avant et après traitement thermique à 900°C sont présentés dans le tableau suivant.

Tableau Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document..6 : Perte de masse et retrait volumique des éprouvettes sous l'effet du traitement thermique à 900°C

	Avant Traitement thermique				Après traitement thermique				Perte de masse (%)		Retrait Volumique (%)
	m[g]	V[cm ³]	m[g]	V[cm ³]	m[g]	V[cm ³]	m[g]	V[cm ³]			
Comp.	BX		MK		BX		MK		BX	MK	MK/BX
C11	472	256	506	256	429	256	477	256	9,11	5,73	0,00
C12	494	256	511	256	468	256	491	256	5,26	3,91	0,00
C13	498	256	517	256	490	256	500	256	1,61	3,29	0,00
C14	515	256	527	256	501	256	507	256	2,72	3,80	0,00
C15	517	256	530	256	505	256	509	256	2,32	3,96	0,00

D'après les tableaux, on voit que la perte de masse sous l'effet du traitement thermique 900°C diminue. Cela signifie que si la quantité en liant augmente alors le retrait devient de plus en plus faible. On constate une perte de masse de 10,20 à 2,72 % pour le béton-BX tandis que 6 ;02 à 3,80 % pour le béton-MK.

Cette diminution de retrait est due aussi au fait qu'entre 600°C et 900°C, il y a décomposition de la matière kaolinite en métakaolin ; alors que notre matière première a déjà passé à ce stade pendant son prétraitement. D'où, entre ces températures la diminution de masse est évidente.

Nous pouvons dire alors que, plus le rapport en liant géopolymère augmente, plus le pourcentage de retrait est réduit. En revanche, il n'y a pas de retrait volumique pendant le traitement thermique.

4.3.2. Essai mécanique

4.3.2.1. Résistance à la compression : RC

Le tableau ci-dessous montre la résistance à la compression avant et après traitement thermique à 900°C des compositions.

Tableau Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document..7 : Résistance à la compression en fonction de la variation de la quantité du liant

Comp.	Liants[g]	Rc avant traitement thermique du Béton[MPa]		Rc après traitement thermique du Béton[MPa]	
		BX	MK	BX	MK
C11	60	4,87	7,89	5,06	3,88
C12	80	5,04	7,52	3,13	3,36
C13	90	3,67	7,19	2,84	1,44
C14	100	2,61	6,54	2,65	1,12
C15	110	2,58	6,5	2,6	1,08

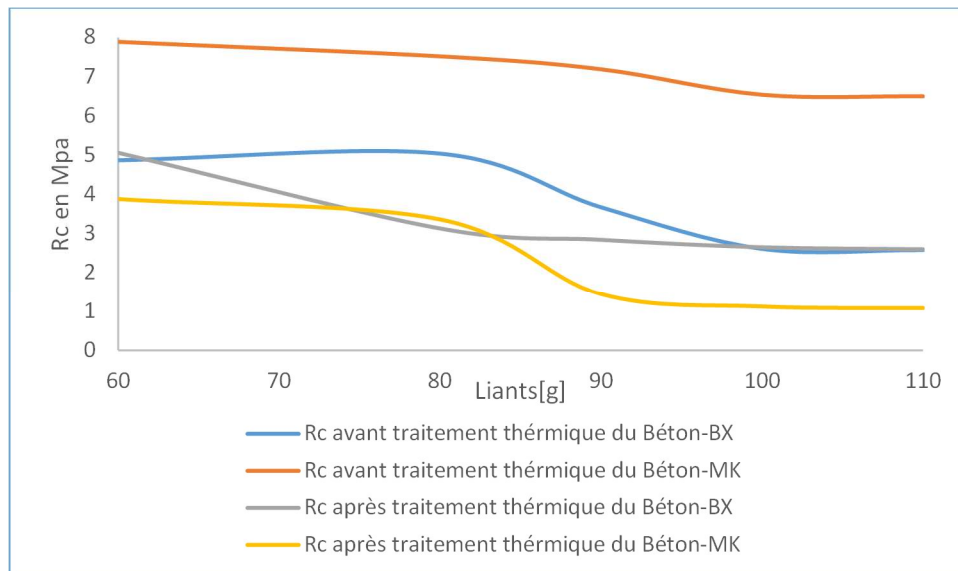


Figure Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document..23: Comparaison de la résistance à la compression avant et après traitement thermique 900°C

D'après les résultats obtenus dans le tableau et la figure, nous constatons que la résistance du Béton-MK est plus résistante par rapport à la résistance du Béton-BX avant traitement thermique, mais, après traitement thermique ces sont du cas contraire :

Avant traitement thermique, le béton-MK a une Rc=7,89 MPa (60g), ce qui est légèrement supérieur par rapport au béton-BX avec une Rc=5,04 MPa (80g).

Après traitement thermique, le béton-BX a une Rc=5 MPa (60g), ce qui est légèrement supérieur aussi par rapport au béton-MK avec une Rc=3,68 MPa (60g).

Le liant joue un rôle très important dans la résistance du béton c'est pour cela qu'on a essayé de varier la quantité du liant à 60 à 110g.

4.3.2.2. Résistance en traction par flexion

Le tableau ci-après nous montre les valeurs de la résistance en traction par flexion appliquée au béton-BX et au béton-MK :

Tableau Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document..8 : Résistance au en traction par flexion en fonction de la variation de la quantité du liant

Comp.	Liants[g]	Rf avant traitement thermique du Béton[MPa]		Rf après traitement thermique du Béton[MPa]	
		BX	MK	BX	MK
C11	60	0,14	2,88	1,07	1,35
C12	80	0,77	3,02	0,68	1,35
C13	90	3,52	3,09	2,7	0,68
C14	100	1,55	2,81	1,58	0,62
C15	110	1,53	2,79	1,56	0,58

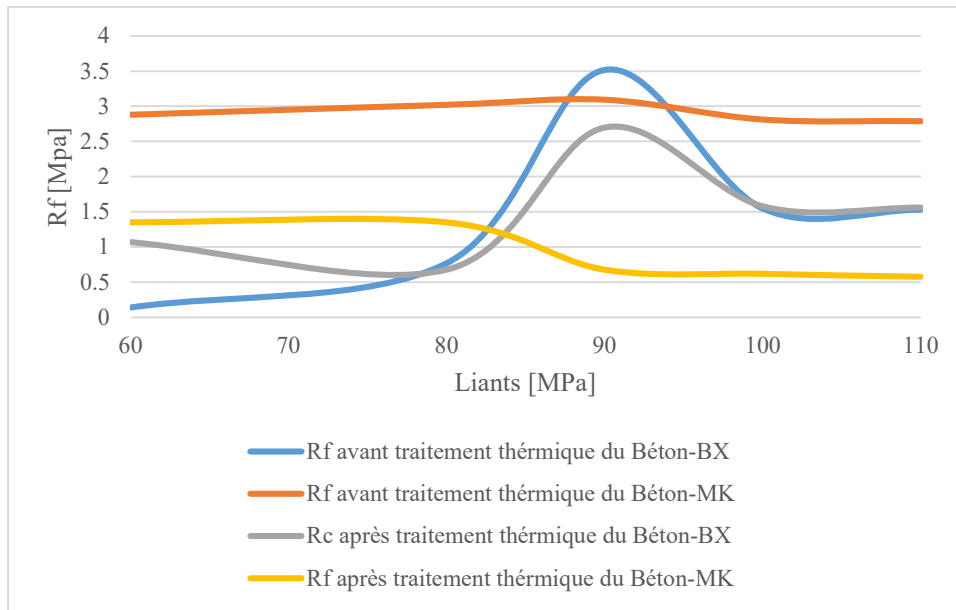


Figure Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document..24 : Comparaison de la résistance en traction par flexion avant et après traitement thermique

D'après les résultats obtenus dans le tableau et la figure, nous voyons que la résistance en traction par flexion Rf du béton-BX est plus résistante par rapport au Rf du béton-MK :

Avant traitement thermique, le béton-BX a une Rf=3,52 MPa (90g), ce qui est légèrement supérieur par rapport au béton-MK avec une Rf =3,09 MPa (90g).

Après traitement thermique, le béton-BX a une Rf=2,70 MPa (90g), ce qui est supérieur par rapport au béton-MK avec une Rf=1,35 MPa (60g) et (80g).

Nous remarquons qu'en remplaçant du métakaolin au lieu de la bauxite dans le rapport massique Rm1 de l'aluminosilicate, le temps de prise des éprouvettes diminue car on peut démouler facilement les compositions après 24 heures de gâchage

4.4. Traitement thermique à 1000°C sous l'influence de la variation du rapport massique entre sables et gravillons

Dans la suite de notre étude nous avons pris Rm=2,5 ; Rm1=1,8, liant SS = 60g et on varie le rapport massique Rm2 entre la quantité du sable et du gravillon $Rm2 = \frac{m_{sable}}{m_{gravillons}}$ (Rm2.1 à Rm2.5).

La variation de la quantité du granulat se trouve dans le tableau suivant.

Tableau Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document..9 : Variation du rapport massique entre le sable et le gravillon dans le béton basé sur la bauxite (Béton-BX)

Essai	C16-BX-MK	C17-BX-MK	C17-BX-MK	C19-BX-MK	C20-BX-MK
Sable (g)	80	95	110	125	140
Gravier (g)	160	190	220	250	280
Rm2	Rm2.1	Rm2.2	Rm2.3	Rm2.4	Rm2.5

Dosages fixes :

- Aluminosilicate (cendre et bauxite) : 70 g, avec Rm1= 1,8
- Liants : silicate de soude SS = 60g, avec Rm= 2,5

- Eau de gâchage = 50g.

4.4.1. Essai physique

Les résultats de variation des masses et volumes des éprouvettes avant et après traitement thermique à 1000°C sont présentés dans les tableaux suivant.

Tableau Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document..10 : Perte de masse et retrait volumique des éprouvettes sous l'effet du traitement thermique à 1000°C

Comp.	Avant traitement thermique				Après traitement thermique				Perte de masse(%)		Retrait volumique (%)
	m[g]	V[cm ³]	m[g]	V[cm ³]	m[g]	V[cm ³]	m[g]	V[cm ³]	BX	MK	MK/BX
	BX		MK		BX		MK		BX	MK	MK/BX
C16	329	256	382	256	300	256	332	256	8,81	13,09	0,00
C17	401	256	441	256	360	256	383	256	10,22	13,15	0,00
C18	458	256	473	256	415	256	417	256	9,39	11,84	0,00
C19	488	256	478	256	448	256	432	256	8,20	9,62	0,00
C20	540	256	536	256	497	256	485	256	7,96	9,51	0,00

D'après les tableaux, on constate des valeurs décroissantes. A ce niveau de température, nos pertes varient de 7,96 à 10,22 % en masse pour le béton-BX et de 9,51 à 13,15% en masse pour le béton-MK.

Nous pouvons interpréter que dans cette traitement thermique 1000°C, le retrait massique devient plus ou moins faible. Dans cette traitement thermique, nous avons la formation d'un nouveau silicate $2SiO_2$, $3Al_2O_3$ qui est la mullite ou l'alumine δ . Dans cette transformation de la kaolinite en mullite, il y a une libération de silice et cette silice libérée donne une masse vitreuse avec les sels de fer et les autres impuretés.

On peut dire donc que plus la quantité entre le sable et le gravillon dans Rm2 est élevé, plus le pourcentage de retrait devient faible. Mais, plus la quantité entre le sable et le gravillon dans Rm2 augmente, plus la masse volumique augmente aussi.

On remarque qu'il n'y a pas de retrait volumique pendant le traitement thermique.

4.4.2. Essai mécanique

4.4.2.1. Résistance à la compression Rc

Le tableau ci-dessous montre la résistance à la compression avant et après traitement thermique à 1000°C des compositions.

Tableau Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document..11 : Résistance à la compression avant le traitement thermique 1000°C

Comp.	Rm2	Rc avant traitement thermique du Béton[MPa]		Rc après traitement thermique du Béton[MPa]	
		BX	MK	BX	MK
C16	Rm2.1	11,02	11,81	5,48	10,04
C17	Rm2.2	10,04	12,56	8,17	8,58
C18	Rm2.3	8,67	11,19	6,1	9,23
C19	Rm2.4	7,98	10,83	6,76	8,92
C20	Rm2.5	7,14	10,58	7,81	8,47

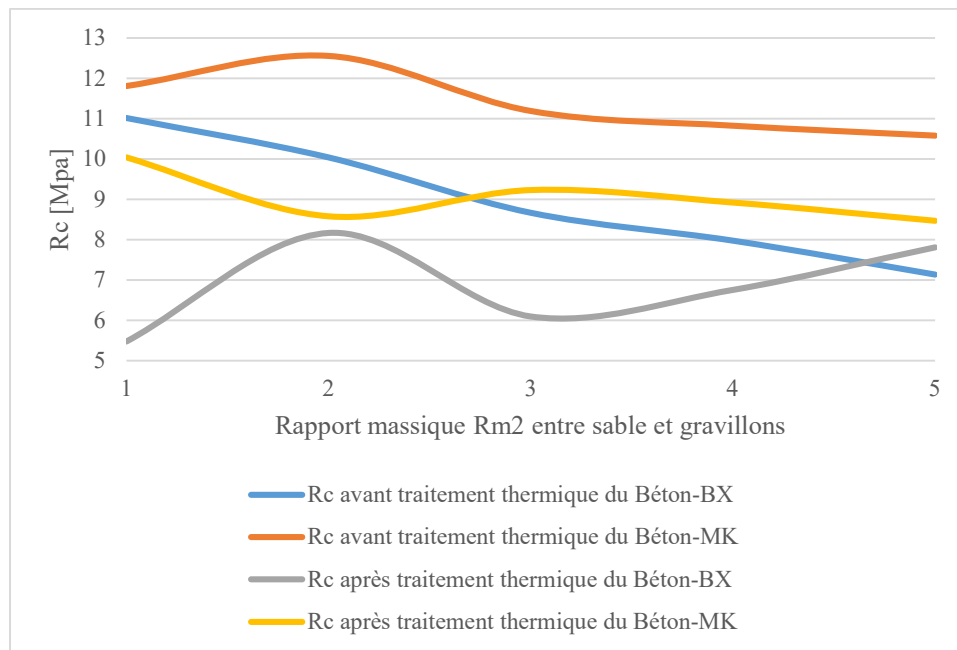


Figure Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document..25: Comparaison de la résistance à la compression avant et après traitement thermique

D'après les résultats obtenus dans le tableau et la figure, nous constatons que la résistance du béton-MK est plus résistante par rapport à la résistance du béton-BX :

Avant traitement thermique, le béton-MK a une $R_c=12,56$ MPa (Rm2.2), ce qui est légèrement supérieur par rapport au béton-BX avec une $R_c=11,02$ MPa (Rm2.1).

Après traitement thermique, le béton-MK a une $R_c=10,04$ MPa (Rm2.1), ce qui est légèrement supérieur aussi par rapport au béton-BX avec $R_c=8,17$ MPa (Rm2.2).

4.4.2.2. Résistance en traction par flexion

Le tableau ci-après nous montre les valeurs de la résistance en traction par flexion appliquée au béton-BX et au béton-MK :

Tableau Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document..12 : Résistance au en traction par flexion en fonction de la variation du rapport massique entre sables et gravillons

Comp.	Rm2	Rf avant traitement thermique du Béton[MPa]		Rf après traitement thermique du Béton[MPa]	
		BX	MK	BX	MK
C16	Rm2.1	0,28	2,25	0,42	1,13
C17	Rm2.2	1,2	2,53	0,56	1,69
C18	Rm2.3	1,55	2,6	0,68	1,27
C19	Rm2.4	1,95	2,82	0,70	1,18
C20	Rm2.5	2,18	2,95	0,72	1,13

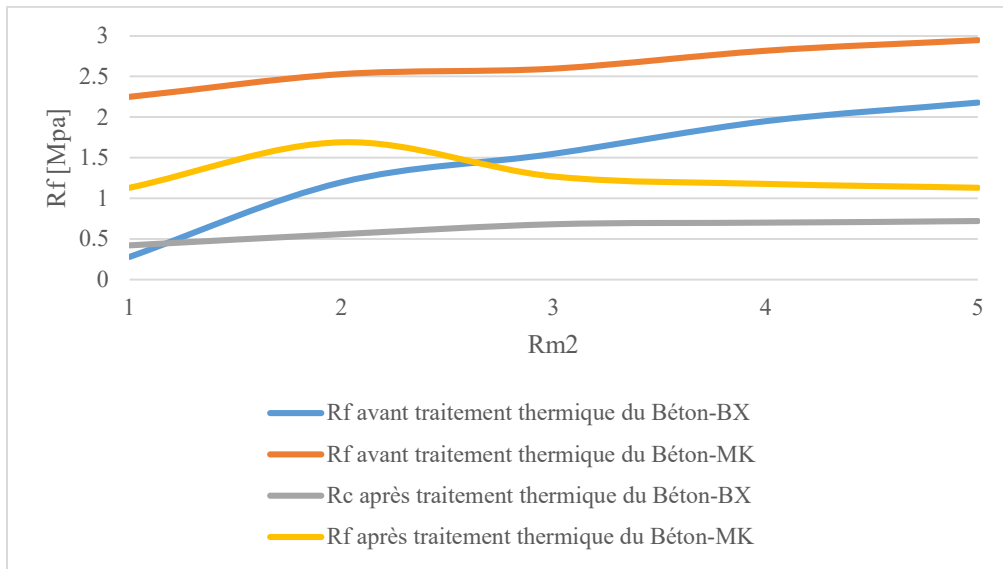


Figure Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document..26: Comparaison de la résistance en traction par flexion avant et après traitement thermique

D'après les résultats obtenus dans le tableau et dans la figure, nous constatons que la résistance en traction par flexion du béton géopolymère basé sur le métakaolin (béton-MK) est plus résistante par rapport à la résistance en traction par flexion du béton géopolymère basé sur la bauxite (béton-BX), explication :

Avant traitement thermique, le béton-MK a une résistance en traction par flexion de 2,95 MPa (Rm2.5), ce qui est légèrement supérieur par rapport au béton-BX avec une résistance en traction par flexion de 2,18 MPa (R2.5). Pour le béton-MK et le béton-BX, le graphe nous montre que plus on augmente la quantité entre les sables et les gravillons, plus la résistance en traction par flexion augmente aussi.

Après traitement thermique, le béton-MK a une Rf de 1,69 MPa (R2.2), ce qui est supérieur par rapport au béton-BX avec une Rf de 0,72 MPa (Rm2.5). Pour le béton-BX, le graphe nous montre qu'à l'intervalle de 80 à 95 g de quantité du sables (ou 160 à 190g de quantité du gravillon) la résistance Rf croît lentement. Mais, lorsque la quantité du sable supérieur à 95 g (ou la quantité de gravillons plus de 190 g) la résistance Rf reste constante. Pour le béton-MK, le graphe nous montre qu'à l'intervalle de 80 à 95 g de quantité du sable (ou 160 à 190g de quantité du gravier) la résistance Rf croît énormément, mais lorsque la quantité de sable supérieur à 95 g (ou la quantité de gravillons plus de 190 g) la résistance Rf diminue.

V. CONCLUSION

L'objectif est de trouver des nouvelles formulations en utilisant les ressources naturelles locales telles que le kaolin, la bauxite et la cendre de balle de riz.

Concernant la formulation de notre béton géopolymère qui résiste à une température élevée (réfractaire), on a mélangé le liant géopolymère avec la cendre de balle du riz, la bauxite calcinée à 750°C et le granulats. Lors de la comparaison, en remplaçant la bauxite calcinée par le métakaolin pour connaître la meilleure performance de ces deux matériaux réfractaire.

Pour atteindre les meilleurs résultats, nous avons déterminé la variation du rapport molaire, la variation du rapport massique entre la bauxite et la cendre de balle de riz, la variation de la quantité du liant et enfin la variation du rapport massique entre la quantité du sable et la quantité du gravillon.

Les caractérisations menées sur les éprouvettes de béton ont montré des résultats satisfaisants. En effet, les valeurs d'une résistance à la compression avant traitement thermique atteignent de 12,56 MPa en 7 jours pour le béton-MK et 11,02 MPa en 7 jours pour le béton-BX, ainsi que 10,04 MPa pour le béton-MK et 8,17 MPa pour le béton-BX après traitement thermique à 1000°C.

Ces différentes caractéristiques nous permettent l'utilisation éventuelle de ces bétons géopolymères à des températures inférieures ou égale à 1400°C en tant que matériaux réfractaire.

REFERENCES

- [1] D. Hardjito, S. E. Wallah, D. M. J. Sumajouw, et B. V. Rangan, « On the Development of Fly Ash-Based Geopolymer Concrete », *ACI Mater. J.*, p. 6, 2004.
- [2] J. Davidovits, « Geopolymers: Inorganic polymeric new materials ». 1991.
- [3] S. A. RADOELIZO, « Contribution à l'étude des bétons hautes performances-utilisation du metakaolin comme fines d'ajout », 2008.
- [4] RANDRIANTSEHENO José, « étude et essai de fabrication d'un matériau géopolymère anti-feu à base de metakaolin, silicate de soude et de cendre de balle de riz », 2017
- [5] N. H. RAKOTOSON, « Elaboration et caractérisation de brique réfractaire à base de liant géopolymère et de bauxite calcinée », 2015.
- [6] S. H. RAZAFINDRABE, « Etude sur l'utilisation de la bauxite et du kaolin en fabrication de réfractaire », 2008.
- [7] F. ANDRIAMANANTSOA, « Contribution à une formulation de pate de réfractaire en vue de la substitution de l'utilisation de béton réfractaire dans les minifonderies de Madagascar », 2014.
- [8] T. RAVAHARILAZA, « Contribution à l'utilisation d'un matériau réfractaire isolant pour la réfection d'un four de laboratoire de chimie minérale de Vontovorona », 2016.
- [9] H. M. RATSIMBAZAFY, « Contribution à l'étude de la production d'un ciment géopolymérique à base de métakaolin, et de cendres de balle de riz », 2012.
- [10] N. M. RAKOTONANDRASANA, « Contribution à l'étude de valorisation de la bauxite d'Antanifotsy », 2011.
- [11] R. A. KOERA, « Formulation des bétons drainants à partir de liant cimentaire et géopolymère », 2021