

# *Valorisation des Matières Premières Locales pour l'étude de formulation d'un Enduit Géopolymère : Balle de Riz, Kaolin et Chaux*

RAKOTOARINDRIAKA Solofaly Philbert<sup>1</sup>, RAKOTOVOAVY Mampitsoa<sup>2</sup>, RAKOTOSAONA Rijalalaina<sup>1</sup>, RATSIMBAZAFY Hery Mikaela<sup>1,3</sup>, KOERA Rasoloniaina Antoine<sup>1</sup>.

<sup>1</sup>Ecole Doctorale en Sciences et Techniques de l'Ingénierie et de l'Innovation

<sup>2</sup>Université d'Antananarivo, Institut d'Enseignement Supérieur d'Antsirabe – Vakinankaratra, Mention Génie Civil

<sup>3</sup>Centre National de Recherches Industrielle et Technologique, Département Matériaux et Génie Civil

*Correspondant* : r.solofaly@gmail.com



**Résumé** – Cette étude explore le potentiel des géopolymères dans la formulation d'enduits de haute qualité, en mettant l'accent sur l'utilisation de matières premières locales telles que le kaolin, la chaux et les cendres de balle de riz. Dans un contexte où l'industrie des matériaux de construction est confrontée à des défis économiques et environnementaux, cette recherche vise à proposer des solutions innovantes et durables.

À travers une approche expérimentale, les variations des rapports molaire et massique sont étudiées pour évaluer leur impact sur les propriétés mécaniques des enduits géopolymères. Les résultats mettent en évidence l'importance de ces paramètres dans l'optimisation des performances des enduits tout en minimisant les coûts de production.

**Mots clés** – Géopolymère, Matières premières locales, Rapport molaire, Rapport massique, Résistance mécanique, Dolomie, Sable, Chaux, Métakaolin, Silicate de soude.

**Abstract** – This study explores the potential of geopolymers in formulating high-quality coatings, focusing on the use of local raw materials such as kaolin, lime, and rice husk ash. In a context where the construction materials industry faces economic and environmental challenges, this research aims to propose innovative and sustainable solutions.

Through an experimental approach, variations in molar and mass ratios are studied to assess their impact on the mechanical properties of geopolymers coatings. The results highlight the importance of these parameters in optimizing the performance of coatings while minimizing production costs.

**Keywords** – Geopolymer, Local raw materials, Molar ratio, Mass ratio, Mechanical resistance, Dolomite, Sand, Lime, Metakaolin, Sodium silicate.

## I. INTRODUCTION

L'industrie des matériaux de construction à Madagascar fait face à des défis significatifs, notamment la rareté des matières premières et les coûts élevés de production. Cette conjoncture souligne l'importance de trouver des alternatives durables et économiques pour stimuler le développement de ce secteur. La nécessité de valoriser les ressources locales devient cruciale pour favoriser l'essor économique du pays.

Cette recherche s'inscrit dans le contexte de la nécessité de dynamiser l'industrie des matériaux de construction à Madagascar en explorant des solutions innovantes et durables. La question centrale à laquelle cette étude tente de répondre est la suivante : comment valoriser efficacement les ressources naturelles locales abondantes, telles que le kaolin, la chaux et les cendres de balle de riz, pour formuler des enduits de haute qualité, tout en minimisant les coûts de production ?

L'intérêt majeur de cette étude réside dans la volonté d'apporter des solutions concrètes aux défis rencontrés par l'industrie des matériaux de construction à Madagascar. En explorant les dimensions économiques, environnementales, et sociales liées à l'utilisation de géopolymères dans la formulation d'enduits, nous cherchons à démontrer que l'innovation dans ce domaine peut contribuer de manière significative au développement durable.

En abordant cette question, nous émettons l'hypothèse que l'utilisation de géopolymères, un matériau innovant dans le domaine de la construction, pourrait offrir des solutions prometteuses. Ces géopolymères, issus de la réaction chimique entre des matières premières locales et un activateur alcalin, pourraient constituer la base d'enduits tout prêts, présentant des propriétés mécaniques supérieures tout en étant respectueux de l'environnement.

Les concepts clés, tels que la valorisation des ressources locales, la durabilité, et l'innovation, seront au cœur de notre recherche. Nous examinerons différentes approches et définitions pour éclairer notre étude et positionner notre recherche dans le contexte scientifique actuel.

Dans le contexte actuel de l'industrie des matériaux de construction à Madagascar, la valorisation des matières premières locales dans la fabrication d'enduits géopolymères émerge comme une initiative stratégique. Ce projet s'inscrit dans un cadre spatial localisé, visant à exploiter les ressources naturelles abondantes du pays, notamment le kaolin, la chaux, et les cendres de balle de riz, pour développer des solutions innovantes dans la formulation d'enduits géopolymères.

L'objectif de cette recherche est de démontrer comment l'utilisation des géopolymères issus de matières premières locales peut conduire à la fabrication d'enduits de haute qualité, à moindre coût, tout en respectant les principes de durabilité. En cela, nous cherchons à contribuer à l'avancement de l'industrie des matériaux de construction à Madagascar.

La problématique centrale de notre étude réside dans la recherche de solutions pour surmonter les obstacles actuels de l'industrie des matériaux de construction à Madagascar. Comment l'utilisation des géopolymères peut-elle être optimisée dans la formulation d'enduits pour favoriser le développement économique et durable du pays ?

L'analyse des propriétés physiques et chimiques des géopolymères, l'exploration des méthodes de production d'enduits, et l'évaluation des performances à travers des tests expérimentaux.

## **II. MATÉRIELS ET METHODES**

Dans cette partie nous allons voir le processus de fabrication des éprouvettes de l'enduit par le procédé de la géopolymérisation. Les matériaux utilisés, les paramètres de fabrication de l'enduit, les essais de fabrication et le test de produits obtenus.

### **2.1. Matières premières**

Les matières premières que nous avons utilisées pendant l'élaboration de notre enduit à base de géopolymère sont :

- Métakaolin
- Cendre de balle de riz
- Soude
- Chaux
- Dolomie
- Sable
- Eau

## 2.2. Matériels utilisés

Pendant les essais, les matériels que nous avons utilisés sont :

- Balance de précision ;
- Moule parallélépipédique de dimension 4cm\*4cm\*16cm ;
- Broyeur ;
- Tamis de 0,4mm ;
- Truelle ;
- Table vibrante ;
- Presse universelle.

## 2.3. Processus de fabrication des matériaux géopolymères

Les étapes à suivre pendant les essais pour la fabrication de l'enduit :

- Préparation du liant géopolymère : Silicate de soude
- Mélange et malaxage de la pâte et liant
- Moulage et démoulage
- Prise d'âge

### 2.3.1. Préparation du silicate de soude

La préparation du silicate de soude se déroule en trois étapes distinctes, impliquant trois composants clés : la cendre de balle de riz, l'eau et la soude.

1ère étape : Dissolution de la soude dans l'eau avec ajout de pesanteur :

- Incorporation de la soude dans l'eau en appliquant une pesanteur.
- Homogénéisation du mélange pour garantir la solubilité de la soude dans l'eau.



*Figure 1 : Préparation de la solution de soude*

2ème étape : Introduction de la cendre dans la solution de soude :

- Intégration de la cendre de balle de riz à la solution de soude dissoute.
- Agitation du mélange pour assurer une répartition uniforme de la cendre pendant trois minutes.



*Figure 2 : Ajout d'une cendre dans la solution de soude*

Cette étape engendre une réaction exothermique, provoquant une augmentation de la température du récipient à environ 50 à 55 °C pendant la réaction.



*Figure 3 : Réaction exothermique*

3<sup>ème</sup> étape : Refroidissement du mélange pendant 5 minutes :

- Période de refroidissement de la solution post-mélange.
- Stabilisation de la réaction exothermique



*Figure 4 : Refroidissement du silicate de soude*

### 2.3.2. Mélange et malaxage

Après avoir préparé les quantités requises de cendre de balle de riz (CBR), de métakaolin (MK), de soude, de chaux (CX), de dolomie (D) et de sable (S), le processus de mélangeage est entamé jusqu'à obtenir un mélange homogène. Ensuite, de l'eau et du silicate de soude sont ajoutés au mélange, et une étape de malaxage manuel est initiée.



*Figure 5 : Mélange des matériaux*

Une fois la pâte et le liant soigneusement préparés, on se concentre sur le malaxage, où on mélange soigneusement ces deux éléments de manière approfondie.



*Figure 6 : Mélange et malaxage de la pâte de liant*

### 2.3.3. Moulage et démoulage

#### – Moulage

Pour le moulage, on commence par préparer les moules de dimensions 4cm\*4cm\*16cm en les enduisant avec des graisses pour faciliter le démoulage.



*Figure 7 : Moule 4cm\*4cm\*16cm*



*Figure 8 : Moulage sur la table vibrante*

La composition s'effectue sur une table vibrante par couches, avec un compactage manuel à travers une démouleuse pour atteindre une compacité optimale et un pourcentage de vide idéal. La vibration, qui peut durer de 20 à 40 secondes, facilite la migration des fines particules, assurant un remplissage efficace des vides à l'intérieur de la composition.

#### – Démoulage

Après le moulage, les éprouvettes sont délicatement démoulées avec précaution. Elles sont ensuite conservées dans un environnement aéré pendant 24 heures pour permettre la prise tout en maintenant leur forme.



Figure 9 : Eprouvette obtenue après démoulage

### 2.3.4. Prise d'Age

Cette étape revêt une importance capitale pour notre étude. Les éprouvettes sont laissées à sécher à l'air libre pendant une période de 7 jours, en veillant à ce qu'elles ne soient pas exposées au soleil afin d'éviter la formation de fissures.

## III. RESULTATS ET INTERPRETATIONS

### 3.1. Influence sur la variation du rapport molaire $R_m$ entre $nSiO_2$ et $nNa_2O$

#### 3.1.1. Paramètres de fabrication

Tout d'abord, nous allons procéder à la variation du rapport molaire ( $R_m$ ) défini comme  $nSiO_2/nNa_2O$ , c'est le rapport molaire silice/soude :  $R_m = 1 ; 1,25 ; 1,5 ; 1,75$

En fixant les autres paramètres :

- ✓ Cendre de balle de riz : 110 g
- ✓ Dolomie : 280 g
- ✓ Sable : 74 g
- ✓ Chaux : 296 g
- ✓ Métakaolin : 148g
- ✓ Eau de gâchage : 148 g

#### 3.1.2. Résistance mécanique en fonction de la variation du rapport molaire $R_m$

Le tableau III-1 illustre les résultats des essais sur la résistance mécanique à la traction par flexion ( $R_f$ ) et la résistance à la compression ( $R_c$ ), exposés à différentes valeurs de rapports molaires ( $R_m$ ) après un séchage de 7 jours.

Tableau 1 : Résistance mécanique en fonction de variation de  $R_m$

Comp.	C1	C2	C3	C4
<b><math>R_m</math></b>	1	1,25	1,5	1,75
<b><math>R_f</math> [Mpa]</b>	3,13	3,63	3,19	2,63
<b><math>R_c</math> [Mpa]</b>	13,18	14,9	12,4	16,06

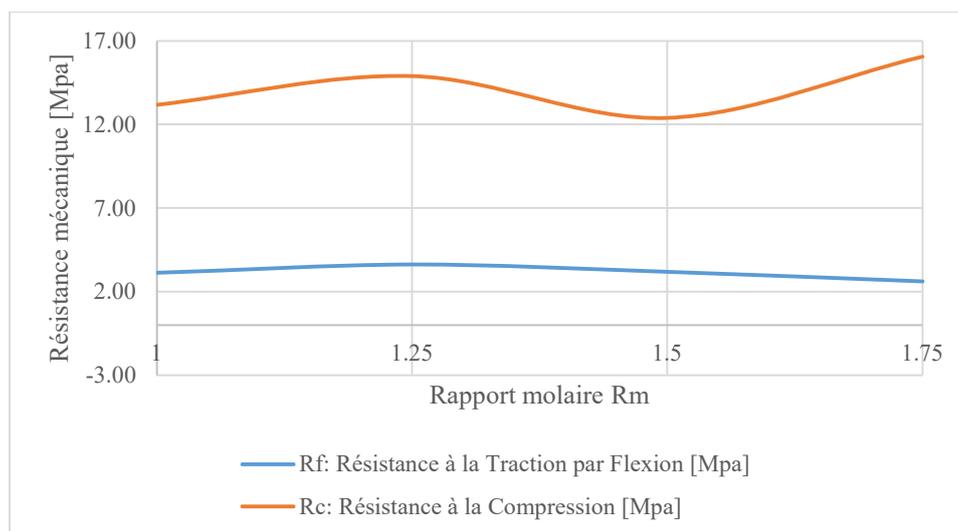


Figure 10 : Résistance mécanique en fonction de variation de Rm

On observe une légère variation de la résistance à la traction par flexion avec les différentes valeurs de Rm. Les valeurs de Rf sont relativement proches les unes des autres, avec une tendance à être plus élevées pour les valeurs de Rm de 1,25 (3,63MPa) et 1,5 (3,19MPa), puis à diminuer pour Rm = 1 et 1,75 (3,13MPa et 2,63MPa). Cette variation est produite aux interactions complexes entre la silice (SiO<sub>2</sub>) et la soude (Na<sub>2</sub>O). Un Rm plus élevé à 1,75 favorise la formation de plus de liaisons polymériques, ce qui renforce la matrice géopolymère et augmente la résistance à la traction par flexion.

Les résultats montrent une tendance plus marquée avec une augmentation significative de la résistance à la compression à mesure que Rm augmente. La Rc est la plus élevée pour Rm=1,75 (16,06MPa), cette augmentation de la résistance à la compression peut être expliquée par une meilleure densification de la structure géopolymère à des valeurs de Rm plus élevées. Un rapport molaire plus élevé favorise une plus grande réaction entre la silice et la soude, entraînant la formation de géopolymères plus denses et donc plus résistants à la compression.

Dans la suite de notre étude nous avons pris Rm = 1,75 et on varie la quantité Dolomie et le Sable.

### 3.2. Influence sur la variation du rapport massique Rm1 entre la Dolomie et le Sable

#### 3.2.1. Paramètres de fabrication

Par la suite, nous prévoyons de varier le rapport massique Rm1 correspondant au rapport massique entre la Dolomie et le Sable, avec les valeurs suivantes :

Tableau 2 : Rapport massique entre Dolomie et sable

Rm1.1		Rm1.2		Rm1.3		Rm1.4	
Dolomie	Sable	Dolomie	Sable	Dolomie	Sable	Dolomie	Sable
270	84	275	79	280	74	290	64
3,21		3,48		3,78		4,53	

Les autres paramètres restent constants :

- ✓ Rm=1,75
- ✓ Cendre de balle de riz : 110 g
- ✓ Chaux : 296 g
- ✓ Métakaolin : 148g

- ✓ Silicate de soude : 444 g
- ✓ Eau de gâchage : 148 g

### 3.2.2. Résistance mécanique en fonction de la variation du rapport massique Rm1

Le tableau Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.-3 ci-dessous expose les résultats de l'essai évaluant l'influence de la résistance mécanique à la traction par flexion et compression en fonction du rapport massique Dolomie/Sable (Rm1) après 7 jours de séchage.

Tableau 4 : Résistance à la traction par flexion en fonction de Rm1

Comp.	C5	C6	C7	C8
Rm1	3,21	3,48	3,78	4,53
Rf [Mpa]	2,38	2,94	4,5	3,5
Rc [Mpa]	10,35	15,72	15,84	13,68

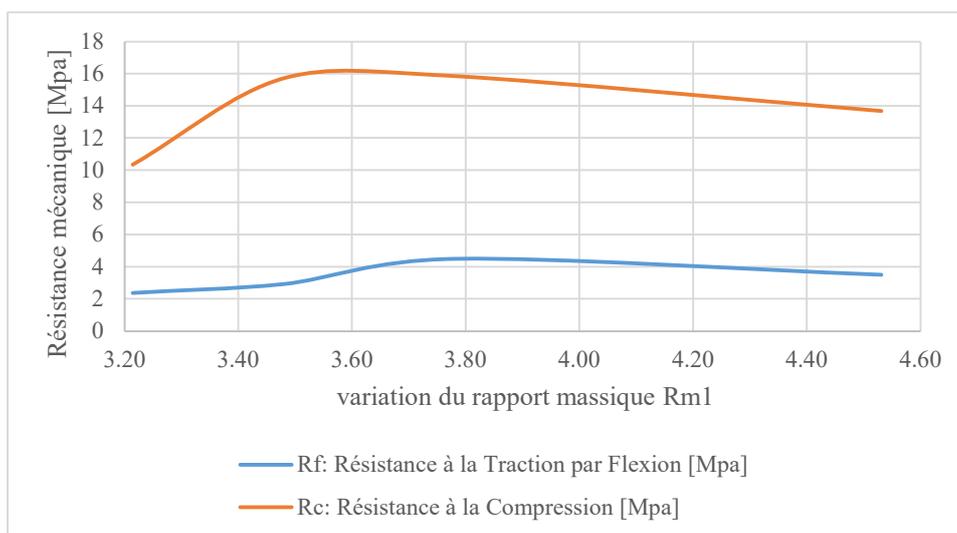


Figure 11 : Evolution de la résistance mécanique en fonction de Rm1

Les résultats montrent une augmentation progressive de la résistance à la traction par flexion avec l'augmentation du rapport massique Dolomie/Sable (Rm1). La valeur la plus élevée de Rf est observée pour Rm1 = 3,78 à 4,5MPa, cette augmentation de la résistance à la traction par flexion peut être attribuée à une meilleure répartition des charges et à une densification accrue de la matrice géopolymère correspond à cette valeur de Rm1. Une plus grande quantité de dolomie par rapport au sable peut renforcer la structure et améliorer la cohésion de l'enduit géopolymère.

Les données révèlent également une augmentation significative de la résistance à la compression avec l'augmentation de Rm1. La Rc atteint sa valeur maximale pour Rm1 = 3,78 (15,84MPa), l'augmentation de la résistance à la compression peut être expliquée par une meilleure distribution des charges et une densification accrue de la structure géopolymère, similaire à ce qui est observé pour la résistance à la traction par flexion. Une proportion plus élevée de dolomie par rapport au sable peut contribuer à renforcer la matrice et à améliorer la capacité de support de l'enduit géopolymère.

Dans la continuité de notre recherche, nous avons choisi Rm1.3=3,78, où la quantité de dolomie est fixée à 280 g et celle de sable à 74 g, tandis que nous faisons varier les proportions de chaux et de métakaolin.

### 3.3. Influence sur la variation du rapport massique Rm2 entre Chaux et Métakaolin

#### 3.3.1. Paramètres de fabrication

Dans la suite de notre étude, nous avons varié le paramètre du rapport massique entre Chaux et Métakaolin (Rm2) selon les valeurs présentées dans le tableau ci-dessus.

**Tableau 5 : Rapport Massique Chaux/Métakaolin (Rm2)**

Rm2.1		Rm2.2		Rm2.3		Rm2.4	
CX	MK	CX	MK	CX	MK	CX	MK
290	153	285	158	300	143	305	138
1,90		1,80		2,10		2,21	

Les autres paramètres sont maintenus constants pour évaluer l'influence spécifique de ce rapport sur les propriétés du matériau géopolymère :

- ✓ Rm=1,75
- ✓ Cendre de balle de riz : 110 g
- ✓ Dolomie : 280 g
- ✓ Sable : 74 g
- ✓ Silicate de soude : 444 g
- ✓ Eau de gâchage : 148 g

#### 3.3.2. Résistance mécanique en fonction de la variation du rapport massique Rm2

Les résultats obtenus par l'essai dévoilent l'influence de la résistance mécanique en fonction du rapport massique Chaux/Métakaolin après un séchage de 7 jours, présenté par le tableau suivant :

**Tableau 6 : Résistance mécanique en fonction de variation du rapport massique Rm2.**

Comp.	C9	C10	C11	C12
<b>Rm2</b>	1,90	2,00	2,10	2,21
<b>Rf [Mpa]</b>	1,81	5,75	2,63	3,13
<b>Rc [Mpa]</b>	5,92	15,81	11,68	18,31

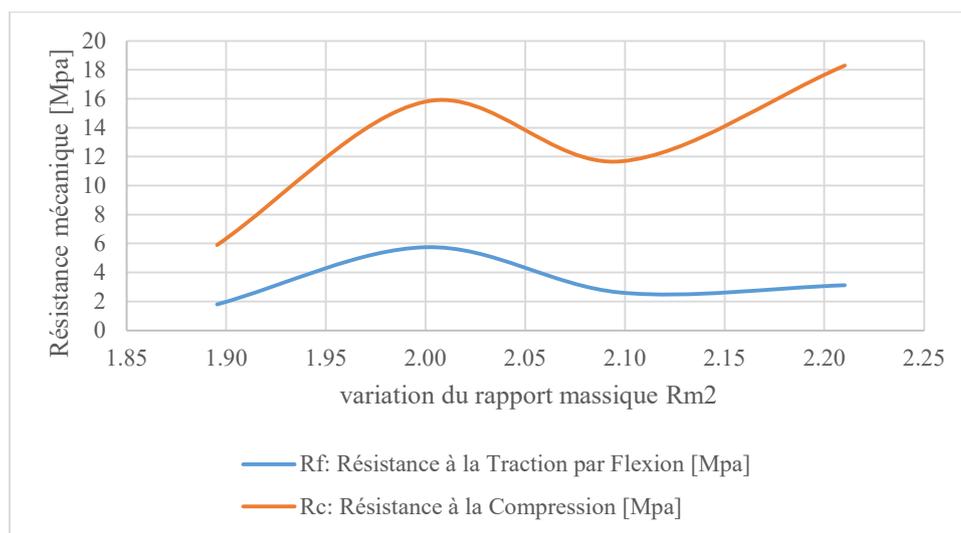


Figure 12 : Evolution de la résistance mécanique en fonction de Rm2

L'analyse des résultats présentés dans le tableau III-6 et la figure III-3 révèle des variations significatives des propriétés mécaniques du matériau géopolymère en fonction du rapport massique Chaux/Métakaolin (Rm2) après 7 jours de séchage.

Tout d'abord, en ce qui concerne la résistance à la traction par flexion (Rf), on observe des valeurs variant de manière notable. Les échantillons C10 (Rm2.2=2) et C12 (Rm2.4=2,21) présentent des valeurs de Rf remarquablement plus élevées, avec respectivement 5,75 MPa et 3,13 MPa, par rapport aux échantillons C9 (Rm2.1=1,90) et C11 (Rm2.3=2,10) qui affichent des valeurs inférieures, à savoir 1,81 MPa et 2,63 MPa.

De même, en ce qui concerne la résistance à la compression (Rc), une tendance similaire est observée. Les échantillons C10 (Rm2.2=2) et C12 (Rm2.4=2,21) affichent des valeurs de Rc nettement plus élevées, avec respectivement 15,81 MPa et 18,31 MPa, comparativement à C9 (Rm2.1=1,90) et C11 (Rm2.3=2,10) qui présentent des valeurs inférieures, à savoir 5,92 MPa et 11,68 MPa.

Une augmentation de ce rapport conduit à une amélioration notable de la résistance à la traction par flexion et à la compression, ce qui souligne l'importance de l'optimisation de ce paramètre dans la formulation des géopolymères pour des applications pratiques.

Poursuivant notre investigation, nous avons sélectionné Rm2.4=2,21, avec une quantité de chaux égale à 305 g et de métakaolin à 138 g, tout en ajustant les proportions de silicate de soude et d'eau.

### 3.4. Influence sur la variation du rapport massique Rm3 entre Silicate de soude et eau

#### 3.4.1. Paramètres de fabrication

Introduction de la variation du rapport massique Rm3=SS/E, le rapport massique entre le Silicate de soude et l'eau, avec les valeurs suivantes :

Tableau 7 : Variation du Rapport Massique SS/E.

Rm3.1		Rm3.2		Rm3.3		Rm3.4	
SS	E	SS	E	SS	E	SS	E
428	164	436	156	444	148	452	140
2,61		2,79		3		3,23	

Les autres paramètres sont maintenus constants :

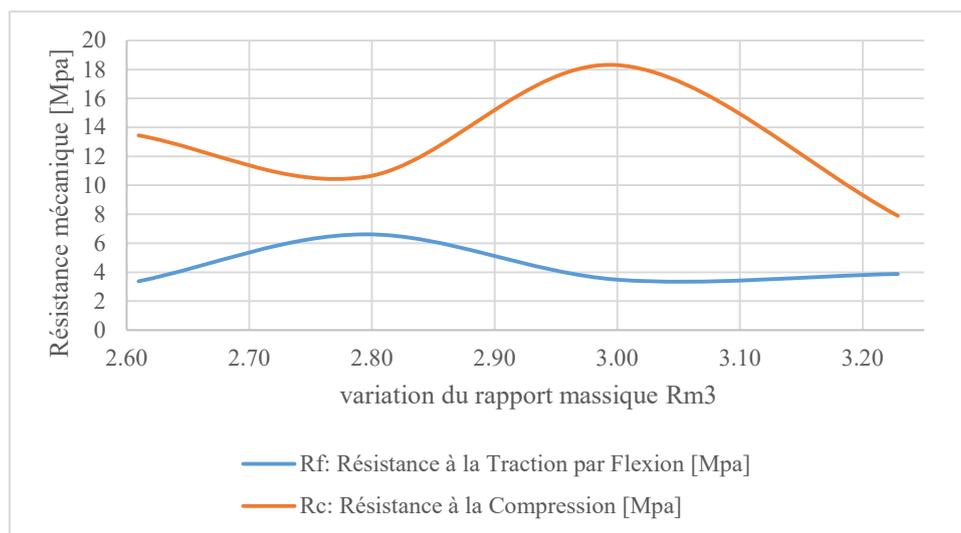
- ✓ Rm=1,75
- ✓ Cendre de balle de riz : 110 g
- ✓ Dolomie : 280 g
- ✓ Sable : 74 g
- ✓ Chaux : 305 g
- ✓ Métakaolin : 138g

### 3.4.2. Résistance mécanique en fonction de la variation du rapport massique

Étude de l'influence du rapport massique Silicate de soude/Eau (SS/E) sur la résistance mécanique est présentés dans le tableau ci-dessous, mettent en lumière les variations de la résistance mécanique en fonction de ce rapport.

**Tableau 8 : Influence sur la résistance mécanique en fonction de Rm3**

Comp.	C13	C14	C15	C16
<b>Rm3</b>	2,61	2,79	3,00	3,23
<b>Rf [Mpa]</b>	3,38	6,63	3,5	3,88
<b>Rc [Mpa]</b>	13,45	10,59	18,31	7,91



**Figure 13 : Evolution de la résistance mécanique en fonction du rapport molaire Silicate de soude/Eau**

La variation de la résistance à la flexion (Rf) démontre une relation significative avec le rapport massique Silicate de soude/Eau (Rm3). À un rapport Rm3 de 2,61, la résistance à la flexion est mesurée à 3,38 MPa. Une augmentation du rapport Rm3 à 2,79 induit une nette amélioration de la résistance à la flexion, atteignant 6,63 MPa. Cependant, à un rapport Rm3 de 3, la résistance à la flexion diminue légèrement à 3,5 MPa, pour ensuite augmenter à nouveau à un rapport Rm3 de 3,23, atteignant 3,88 MPa.

De même, la résistance à la compression (Rc) est également influencée par le rapport massique Rm3. À un rapport Rm3 de 2,61, la résistance à la compression est mesurée à 13,45 MPa. Une légère diminution de la résistance à la compression est observée à un rapport Rm3 de 2,79, tombant à 10,59 MPa. Cependant, à un rapport Rm3 de 3, la résistance à la compression atteint un pic remarquable de 18,31 MPa. En revanche, à un rapport Rm3 de 3,23, la résistance à la compression diminue considérablement à 7,91 MPa.

Le meilleur résultat de  $R_{m3}$  est observé à un rapport de 3, où la résistance à la compression atteint un pic remarquable de 18,31 MPa.

#### IV. CONCLUSION

Après avoir analysé les résultats des essais portant sur la résistance mécanique de l'enduit géopolymère et les variations des rapports molaire et massique, plusieurs conclusions significatives peuvent être tirées.

Premièrement, en ce qui concerne la variation du rapport molaire  $R_m$  ( $nSiO_2/nNa_2O$ ), nous observons des fluctuations dans les valeurs de résistance à la flexion ( $R_f$ ) et à la compression ( $R_c$ ). Par exemple, à un rapport  $R_m$  de 1,75, les valeurs de  $R_f$  et de  $R_c$  sont respectivement de 3,13 MPa et de 16,06 MPa.

Deuxièmement, en ce qui concerne la variation du rapport massique  $R_{m1}$  entre la Dolomie et le Sable, à un rapport  $R_{m1}$  de 4,53, les valeurs de  $R_f$  et de  $R_c$  sont de 3,5 MPa et 15,72 MPa. Ces résultats suggèrent une corrélation entre le rapport massique Dolomie/Sable et la résistance mécanique de l'enduit géopolymère, indiquant que des variations dans ce rapport peuvent influencer significativement les performances mécaniques de l'enduit.

Troisièmement, en ce qui concerne la variation du rapport massique  $R_{m2}$  entre la Chaux et le Métakaolin, à un rapport  $R_{m2}$  de 1,90, les valeurs de  $R_f$  et de  $R_c$  sont respectivement de 3,88 MPa et de 18,31 MPa. Ces résultats mettent en évidence l'impact du rapport massique Chaux/Métakaolin sur la résistance mécanique de l'enduit géopolymère, soulignant l'importance de ce paramètre dans la formulation de l'enduit.

Enfin, en ce qui concerne la variation du rapport massique  $R_{m3}$  entre le Silicate de soude et l'eau, nous observons des variations dans les valeurs de  $R_f$  et de  $R_c$  de 3,38 MPa et de 13,45 MPa à un rapport  $R_{m3}$  de 2,61. Ces résultats soulignent l'importance du rapport massique Silicate de soude/Eau dans la résistance mécanique de l'enduit géopolymère, indiquant que des variations dans ce rapport peuvent influencer les performances mécaniques de l'enduit.

Les résultats de nos essais mettent en évidence l'impact significatif des variations des rapports molaire et massique sur les propriétés mécaniques de l'enduit géopolymère. Ces conclusions fournissent des indications précieuses pour optimiser la formulation de l'enduit géopolymère et améliorer ses performances mécaniques, ce qui pourrait avoir des implications importantes dans le domaine de la construction écologique et durable.

#### REFERENCES

- [1] **Davidovits J.** Geopolymers: Inorganic polymeric new materials. *Journal of Thermal Analysis and calorimetry* 37 (1991)1633-1656
- [2] **RATSIMBAZAFY Hery Mikaela** (2012) « Contribution à l'étude de la production d'un ciment géopolymérique à base de métakaolin, et de cendres de balle de riz » Thèse de Doctorat, Mention Science des matériaux : de l'E.S.P. A, Université d'Antananarivo.
- [3] **Xu H., Van Deventer J.S.J.** The geopolymerisation of alumino-silicate minerals. *International Journal of Mineral Processing* 59 (2000) 247-266.
- [4] **Ismail KHAY** Le 27 juin 2012 (Etude physico-chimique des interfaces chaux/chanvre/argile : Impact sur la rhéologie des mortiers et sur les propriétés mécaniques, thermiques et hydriques du matériau composite) Thèse de Doctorat : Matériaux Céramiques et Traitements de Surface ; Université de Limoges
- [5] **Mr. GHOMARI Fouad** science des matériaux de construction
- [6] **R.H. Roche**, contribution à l'étude des bétons légers à base de balles de riz, comme granulats, 2013.
- [7] **Yawo Daniel Adufu, Seick Omar Sore, Philbert Nshimiyimana, Adamah Messan, Gilles Escadeillas.** Contribution à la formulation d'un béton géopolymère à température ambiante : propriétés physico mécaniques. NOMAD 2022 - 4e conférence internationale francophone Nouveaux Matériaux et Durabilité, IMT Mines Alès; LMGC; LIFAM, Nov 2022, Montpellier, France. hal-03879675