

# *Essai De Fabrication De Panneaux Composites A Base D'un Liant Géopolymère Et De Paille De Riz*

## *[Experimental Manufacturing Of Composite Panels Using A Geopolymer Binder And Rice Straw]*

HASIMBOLA Ny Antsa<sup>1</sup>, RATSARAHASINA Dimbimalala, Mavoniaina<sup>2</sup>, RATSIMBAZAFY Hery Mikaela<sup>3</sup>, KOERA Rasoloniaina Antoine<sup>4</sup>, RANAIVONIARIVO Velomanantsoa Gabriely<sup>5</sup>

<sup>1</sup>École Doctorale en Sciences et Techniques de l'Ingénierie et de l'Innovation  
Antananarivo, Madagascar

Email: nynyantsah@gmail.com

<sup>2</sup>Centre National de Recherches Industrielle et Technologique  
Antananarivo, Madagascar

Email : dimby.ratsara@gmail.com

<sup>3</sup>Centre National de Recherches Industrielle et Technologique  
Antananarivo, Madagascar

Email: mikaela309@yahoo.fr

<sup>4</sup>École Supérieure Polytechnique d'Antananarivo  
Université d'Antananarivo  
Antananarivo, Madagascar

Email: ainakoera@gmail.com

<sup>5</sup>École Supérieure Polytechnique d'Antananarivo  
Université d'Antananarivo  
Antananarivo, Madagascar

Email: ranaivomana@gmail.com

Auteur correspondant : HASIMBOLA Ny Antsa. Email : nynyantsah@gmail.com



**Resumé :** Cette étude a pour objectif de développer des panneaux composites à partir de paille de riz, en utilisant un liant géopolymère à base de silicate de sodium, afin d'obtenir un matériau à la fois performant, écologique et économique. Face à l'augmentation de la consommation de bois et à la problématique de déforestation, il devient nécessaire de recourir à des alternatives durables. La paille de riz, sous-produit agricole largement disponible à Madagascar, constitue un excellent candidat pour la fabrication de matériaux de construction. Les matières premières utilisées ont été soigneusement préparées, puis intégrées à la matrice géopolymère. Des éprouvettes ont été moulées et soumises à différents essais mécaniques et physiques. Les résultats expérimentaux indiquent que les panneaux fabriqués présentent une résistance à la compression avoisinant les 14,12 MPa, une porosité modérée, ainsi qu'une bonne résistance à l'eau. Malgré quelques limites liées à l'échelle de laboratoire, les performances observées sont satisfaisantes. Ce travail met en évidence le potentiel de la valorisation des déchets agricoles dans la fabrication de matériaux de construction innovants. Il contribue également à la réduction de l'impact environnemental, à la promotion de l'économie circulaire et à la création d'un matériau local à faible empreinte carbone. Cette

recherche ouvre des perspectives intéressantes pour le développement de produits biosourcés à l'échelle industrielle, adaptés aux besoins du marché malgache de la construction durable.

**Mots clés :** paille de riz, géopolymère, panneaux, matériaux composites, liant

This study aims to develop composite panels made from rice straw, using a geopolymer binder based on sodium silicate, to obtain a material that is both efficient, eco-friendly, and cost-effective. In response to the increasing consumption of wood and ongoing deforestation, sustainable alternatives have become necessary. Rice straw, an abundant agricultural by-product in Madagascar, represents a promising resource for manufacturing construction materials. The raw materials were carefully prepared and incorporated into the geopolymer matrix. Test specimens were molded and subjected to various mechanical and physical analyses. The experimental results show that the fabricated panels achieved a compressive strength of approximately 14.12 MPa, moderate porosity, and good water resistance. Although the research was carried out at laboratory scale, the observed performance is encouraging. This study highlights the potential of agricultural waste valorization in developing innovative building materials. It also contributes to reducing environmental impact, promoting a circular economy, and creating a locally sourced, low-carbon product. By reusing rice straw, this approach turns an environmental challenge into a valuable opportunity. The findings suggest that rice-straw-based geopolymer panels can meet certain construction needs in Madagascar while supporting sustainable development. The work opens up further possibilities for scaling up production and integrating bio-based alternatives in the local construction sector. This research lays the groundwork for future innovations in green building materials.

**Key words:** rice straw, geopolymer, panels, composite materials, binder

## I. INTRODUCTION

Face à la raréfaction des ressources naturelles [1] et à la déforestation accélérée causée par la forte consommation de matières premières issues du bois, le développement de matériaux alternatifs, durables et respectueux de l'environnement devient une priorité dans le secteur de la construction. À Madagascar, pays à dominante agricole [2], la culture du riz occupe une place centrale, avec une production générant d'importantes quantités de résidus organiques, notamment la paille de riz. Son potentiel comme substitut écologique au bois est renforcé par sa disponibilité locale, son faible coût et sa capacité à s'intégrer dans une logique d'économie circulaire. [3][4] Dans un contexte de transition écologique et d'urbanisation croissante, l'intégration de la paille de riz dans la conception de panneaux composites représente une alternative innovante et pertinente. La présente étude, intitulée « *Essai de fabrication de panneaux composites à base d'un liant géopolymère et de paille de riz* », vise à explorer cette voie. L'utilisation d'un liant géopolymère à base de silicate de sodium permet d'optimiser les propriétés mécaniques du matériau final tout en limitant l'impact environnemental du procédé. Cette recherche s'inscrit dans une démarche de valorisation de déchets agricoles au service d'une construction plus durable et plus locale.

## II. MATERIELS ET METHODES

En vue d'obtenir de résultats optimaux, la bonne préparation au préalable des matières premières est obligatoire.

Les matières premières utilisées dans notre étude sont :

- Kaolin de PROCHIMAD ;
- Cendre de balle de riz (RHA) ;
- Chaux BOUTSIKA ;
- Soude caustique de chez SPCI ;
- Paille de riz ;
- Sable de rivière ;
- Eau de JIRAMA.

## 2.1. Matériels

Les matériels utilisés lors de cette étude sont :

- Broyeur/Mixeur ;
- Tamis d'ouverture 0,4 mm et 2 mm ;
- Balance de précision ;
- Récipients pour le mélangeage ;
- Marteau ;
- Grande spatule ou cuillère pour mélanger les matières premières ;
- Moule parallélépipédique en acier de longueur 160 mm, de largeur 40 mm et de hauteur 40 mm.

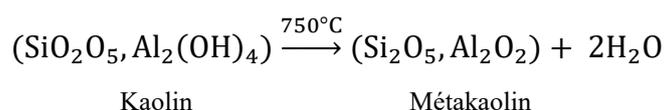
## 2.2. Méthodologie

Voici les étapes de la préparation des matières premières :

### 2.2.1. Obtention du métakaolin

Pour la préparation, nous avons utilisé le kaolin déjà micronisé de classement granulométrique 40 $\mu$ m. Pour avoir le métakaolin, il est nécessaire de transformer le kaolin par calcination dans un four à 750°C pendant 3 h puis on le laisse refroidir. [5]

On a la réaction :



### 2.2.2. Préparation de la cendre de balle de riz (RHA)

Voici les étapes de préparation de cendres de balle de riz :



**Figure 1: Étapes de fabrication de RHA**

### 2.2.3. Préparation de la paille de riz

Après avoir laissé sécher au soleil et coupé les pailles de riz en petits morceaux, elles sont préparées par simple broyage jusqu'à ce que de fragments de particules apparaissent. Lors de nos expérimentations, nous avons fait passer la paille de riz broyée au tamis dont la maille est inférieure à 800  $\mu$ m.

### 2.2.4. Préparation du sable

Il faut bien choisir les dimensions correctes des matières premières comme le sable en faisant l'analyse granulométrique. Le sable doit être moyen, de classe granulaire 0/2 mm.

### 2.2.5. Préparation de la soude caustique

La soude caustique de formule chimique NaOH joue le rôle de réactif de synthèse. Elle est distribuée par l'entreprise SPCI sous forme de granule

### 2.2.6. Préparation de la chaux

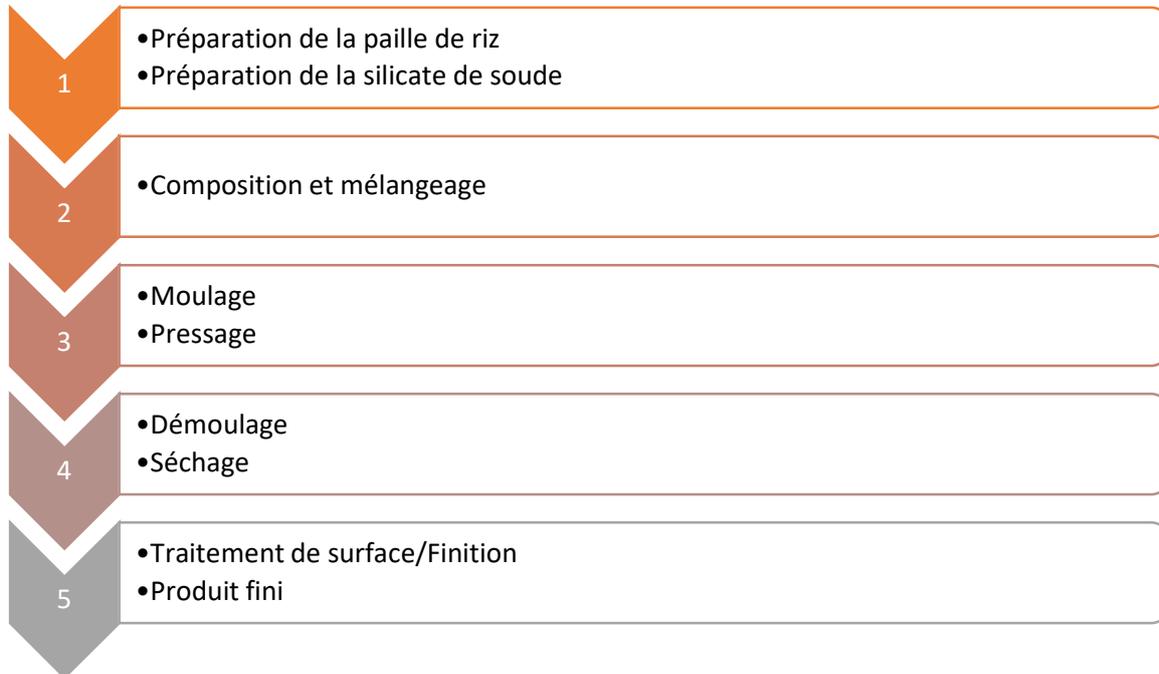
Dans notre étude, on a utilisé la chaux commerciale BOUTSIKA (sac de 4kg), chaux produite par l'Exama à Madagascar.

### 2.2.7. Préparation de l'eau

L'eau utilisée doit être propre, si possible potable, et ne pas contenir de sels pouvant modifier le temps de prise. A ce titre nous utilisons l'eau de la JIRAMA.

## III. FABRICATION DES EPROUVETTES

1.1. Description du processus de fabrication Le processus de fabrication des panneaux comprend les phases successives



*Figure 2: Description du processus de fabrication*

indiquées sur la figure suivante :

L'étude a été réalisée sur des éprouvettes parallélépipédiques de dimensions 4cm×4cm×16cm

### 1.2. Préparation du liant géopolymère (silicate de soude)

La synthèse du silicate de soude se fait par la réaction de la soude avec de la silice amorphe, précisément, on fait en sorte de rendre soluble la silice amorphe en milieu basique à basse température (de l'ordre de 100°C), voire à température ambiante.

La figure ci-dessous montre la préparation de notre liant silicate de soude, qui consiste à mélanger de la cendre de balle de riz, de l'eau et de la soude.



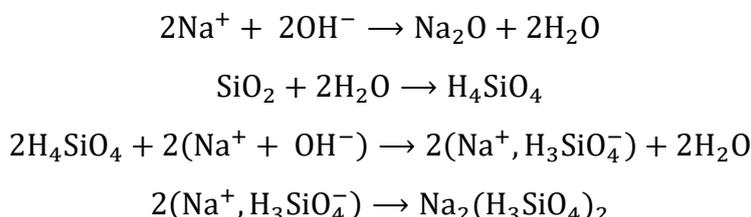
**Figure 3: Fabrication de silicate de soude**

On définit le module noté  $R_m$  par le rapport entre le nombre de mole de  $SiO_2$  et  $Na_2O$ .

$$R_m = \frac{n_{SiO_2}}{n_{Na_2O}}$$

- Pour  $R_m > 1$ , nous avons un module acide ou abrasif (comme la colle) ;
- Pour  $R_m \leq 1$ , on a un module basique ou détergent (comme le savon).

La réaction chimique de la synthèse du silicate de soude, de formule chimique  $\text{Na}_2(\text{H}_3\text{SiO}_4)_2$  est la suivante :



Notons que le pH résultant est supérieur à 11.

Durant des essais préliminaires, nous avons constaté que les éprouvettes fabriquées à partir du module basique ( $R_m \leq 1$ ) ne sont pas concluantes, car elles sont très corrosives, molles, et difficile à sécher.

Pour cela, nous avons effectué cinq (5) essais dont les rapports molaires correspondent à des modules acides, qui sont respectivement :

$$R_m = 1 ; R_m = 1,2 ; R_m = 1,4 ; R_m = 1,6 ; R_m = 1,8$$

#### 1.2.1. Dosage en silice et en soude

D'après l'étude faite par RATSIMBAZAFY Hery Mikaela sur la « Contribution de la production d'un ciment géopolymérique à base de métakaolin et de cendres de balle de riz » [6], le dosage molaire optimal de la silice est  $n\text{SiO}_2 = 0,67$  mol.

Lorsqu'on fixe la valeur du rapport molaire  $R_m$ , on obtient le dosage molaire de la soude puisque, pour avoir une mole de  $\text{Na}_2\text{O}$  il faut utiliser deux moles de NaOH.

$$R_m = n\text{SiO}_2 / n\text{Na}_2\text{O}$$

Les proportions de silice et de soude utilisés sont données dans le tableau ci-dessous :

**Tableau 1: Les quantités de chaque constituant pour chaque valeur de  $R_m$**

Essai	1	2	3	4	5
Module $R_m$	1	1,2	1,4	1,6	1,8
$n\text{SiO}_2$ (mol)	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67
$n\text{Na}_2\text{O}$ (mol)	0,67	0,56	0,48	0,42	0,37
$n\text{NaOH}$ (mol)	1,34	1,12	0,96	0,84	0,74

#### 1.2.2. Quantité d'eau utilisée

D'après l'équation bilan ci-dessus, on utilise de l'eau pour transformer le  $\text{SiO}_2$  en  $\text{H}_4\text{SiO}_4$ . En pratique, il faut dissoudre la soude dans de l'eau pour la mettre en solution et faciliter la mise en œuvre. Pendant la réalisation, nous avons effectué quelques essais préliminaires afin de déterminer la quantité d'eau optimale. Et nous avons constaté que la quantité en masse de l'eau doit être égale à la quantité de la cendre.

$$(\text{H}_2\text{O}) = m(\text{RHA})$$

### 1.2.3. Mise en œuvre

Voici les étapes de la fabrication du silicate de soude :

#### a- Pesage

Le pesage est nécessaire pour la préparation de silicate de soude pour avoir un dosage précis. Nous avons pesé chaque matière première.



**Photo 1: Pesage de chaque constituant de silicate de soude (SS)**

#### b- Mélangeage

Après l'opération de pesage, on verse la soude dans l'eau puis on agite.

Lorsque la soude est solubilisée, on ajoute la cendre de balle de riz et on mélange jusqu'à obtention de silicate de soude plus ou moins fluide.

### 1.3. Préparation de la pâte

c- On prépare les quantités nécessaires de paille de riz, métakaolin, cendre de balle de riz, chaux et sable, puis on mélange jusqu'à l'obtention du mélange homogène.



**Photo 2: Mélange et homogénéisation**

d- On ajoute l'eau de gâchage :



**Photo 3: Gâchage**

#### 1.4. Mélange et malaxage de pâte et liant

Lorsque la pâte et le liant sont préparés, on fait le mélange pendant un certain temps jusqu'à l'homogénéisation et le malaxage se fait par un malaxeur. Faute d'appareil, nous effectuons le malaxage manuellement en faisant en sorte d'obtenir un mélange bien homogène avant de mouler.

#### 1.5. Moulage et démoulage

Le moulage est effectué dans des éprouvettes parallélépipédiques de dimension 4cm×4cm×16cm.

La préparation consiste à graisser le moule pour faciliter le démoulage (agent de démoulage), remplir le moule et presser manuellement.

Le démoulage se fait également manuellement 24 h après moulage. Ensuite, les éprouvettes vont être conservées dans un milieu bien aéré afin qu'elles puissent faire prise et garder leur forme.



**Photo 4: Démoulage**

#### 1.6. Séchage

Nous avons séché les échantillons à l'air libre et à l'abri du soleil pendant une durée déterminée avant de les soumettre à des essais mécaniques et physiques.



**Photo 5: Sèchage des éprouvettes**

## II. RESULTATS ET DISCUSSIONS

Pendant les essais expérimentaux, nous avons effectué des essais physiques et mécaniques pour ensuite évaluer le comportement chimique de nos échantillons.

2.1. Les paramètres d'essai On tient compte de deux groupes de paramètres dans la fabrication du panneau :

- Paramètres fixes ;
- Paramètres variables.

2.1.1. Paramètres fixes

Les paramètres fixes que nous considérons sont mentionnés ci-après :

- La température d'incinération de la balle de riz = 600 °C ;
- La finesse de la cendre de balle de riz est inférieure à 0,16 mm ou 160 microns ;
- La température de calcination du kaolin = 750 ° C pendant 3 h ;
- La température de préparation du silicate de soude est la température ambiante ;
- La quantité de la cendre de balle de riz pour la confection des éprouvettes est égale à 12%.

2.1.2. Paramètres variables

Les paramètres que nous avons variés pour rechercher la composition optimale sont :

- Le rapport molaire  $R_m$  ;
- La proportion du sable et de la paille de riz ;
- La quantité de chaux et de métakaolin ;
- La quantité de liant (Silicate de Soude) ;
- Le mode de conservation et l'ajout de l'eau de gâchage dans la pâte.

2.1.2.1. Optimisation du rapport molaire  $R_m$

On a :

$$R_m = \frac{n\text{SiO}_2}{n\text{Na}_2\text{O}}$$

Avec  $R_m = 1 ; 1,2 ; 1,4 ; 1,6 ; 1,8$

- a) Dosages fixes pour une éprouvette :
- Paille = 10%
  - Sable = 9%
  - Aluminosilicate (CBR+MK+CH) = 12% + 5% + 10% = 27%
  - Eau de gâchage = 19%
  - Liant (SS) = 35%
- b) Résistances mécaniques
- Résistance à la Traction par Flexion

Le tableau suivant montre les résultats à la traction par flexion et en fonction du rapport  $R_m$  à 14 jours d'âge :

**Tableau 2: Résistance à la flexion en fonction du rapport  $R_m = n_{SiO_2}/n_{Na_2O}$  après 14 jours**

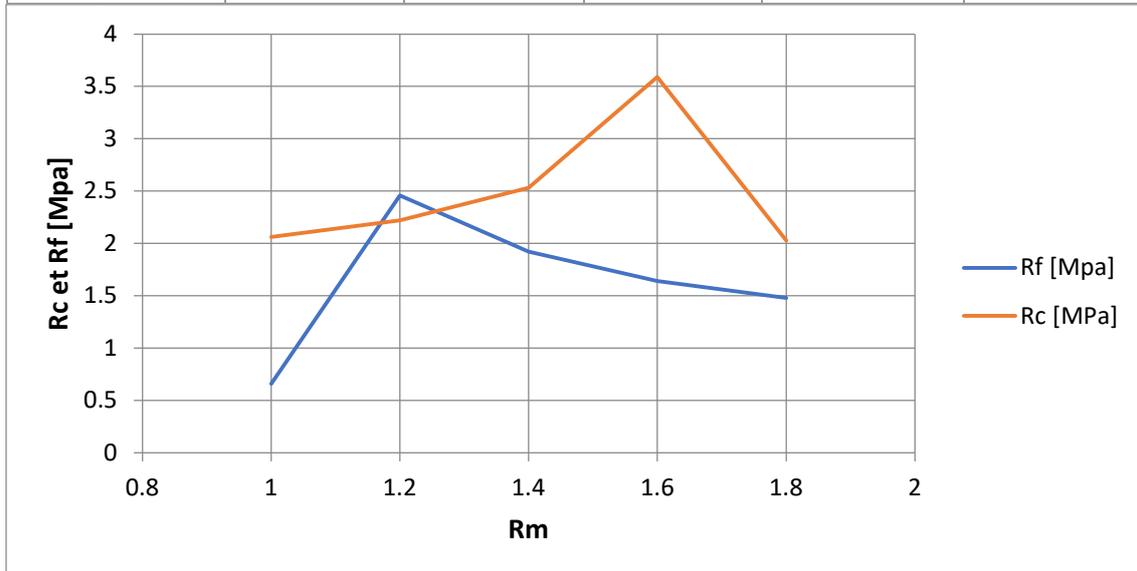
Échantillons	1	2	3	4	5
$R_m$	1	1,2	1,4	1,6	1,8
$R_f$ [MPa]	0,66	2,46	1,92	1,64	1,48

Résistance en compression

Le tableau ci-dessous nous montre les résultats de la résistance en compression en fonction du rapport  $R_m = \frac{n_{SiO_2}}{n_{Na_2O}}$  après 14 jours.

**Tableau 3: Résistance en compression en fonction du rapport  $R_m = n_{SiO_2}/n_{Na_2O}$  après 14 jours**

Échantillons	1	2	3	4	5
$R_m$	1	1,2	1,4	1,6	1,8
$R_c$ [MPa]	2,06	2,22	2,53	3,59	2,03



**Figure 4: Evolution des résistances mécaniques en fonction du rapport molaire  $n_{SiO_2}/n_{Na_2O}$**

### Interprétation

La figure 4 nous montre que :

- Pour  $R_m=1,6$  nous avons un rapport molaire optimum avec une résistance à la compression optimale  $R_c= 3,59\text{MPa}$  ;
- Pour  $R_m < 1,6$  la résistance à la compression est faible à cause de l'excès de soude dans le silicate de soude ;
- Pour  $R_m > 1,6$  on remarque la chute de la résistance à la compression à cause de l'excès de silice dans le silicate de soude.

D'après la figure ci-dessus, on peut remarquer que les résistances à la traction par flexion des éprouvettes sont trop faibles.

Dans la suite de notre étude nous utiliserons le rapport molaire optimal :  $R_m= 1,6$ .

#### 2.1.2.2. Optimisation du sable et de la paille de riz

##### a) Paramètres fixes pour une éprouvette :

- $R_m=1,6$
- Cendre de balle de riz (RHA) = 12%
- Eau de gâchage = 19%
- Liant (SS) = 35%
- Chaux = 10%
- Métakaolin = 5%

On a pour la paille de riz et le sable une quantité totale de 19 %.

On remplace progressivement la paille de riz par du sable.

Le tableau suivant nous montre la variation de la quantité de sable et de paille de riz dans la pâte.

**Tableau 4: Variation de La quantité de sable et de paille de riz dans la pate**

Échantillons	6	7	8	9	10	11
<b>Paille de riz %</b>	16	14,5	13	11,5	10	8,5
<b>Sable %</b>	3	4,5	6	7,5	9	10,5
<b>%RHA/%Sable + %Paille</b>	12/3+16	12/4,5+14,5	12/6+13	12/7,5+11,5	12/9+10	12/10,5+8,5

##### b) Résistances mécaniques

- Résistance à la Traction par Flexion

Le tableau 5 nous montre la résistance à la flexion en fonction du sable et de paille de riz.

**Tableau 5: Résistance à la flexion en fonction du sable et de paille de riz**

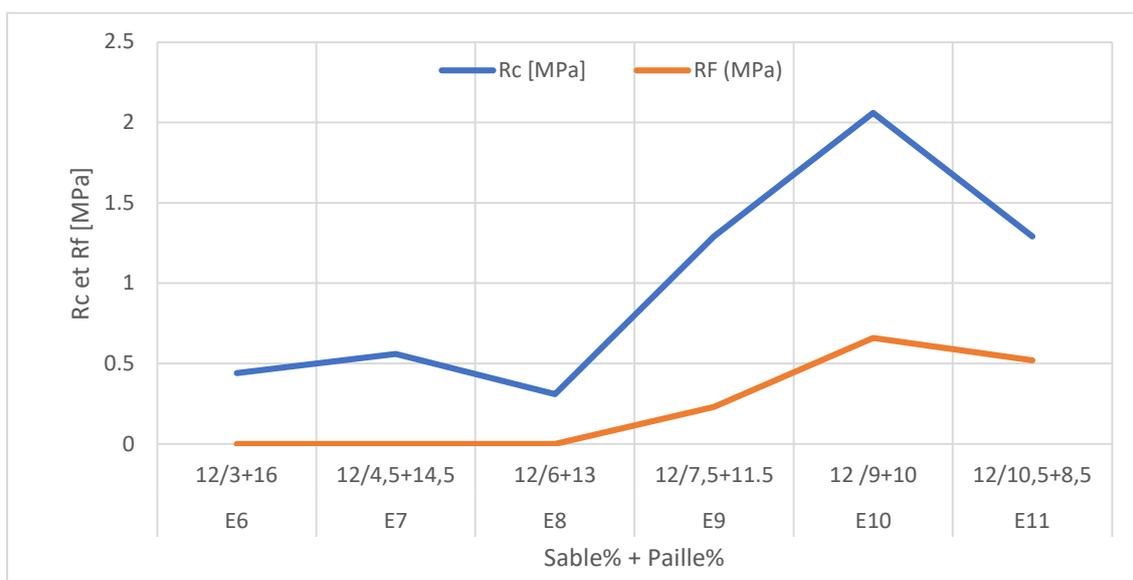
Échantillons	6	7	8	9	10	11
<b>%RHA/%Sable + %Paille</b>	12/3+16	12/4,5+14,5	12/6+13	12/7,5+11,5	12/9+10	12/10,5+8,5
<b>R<sub>F</sub> (MPa)</b>	0	0	0	0,23	0,66	0,52

- Résistance en compression

Le tableau suivant nous montre la résistance en compression en fonction du sable et de paille de riz.

**Tableau 6: Résistance en compression en fonction du sable et de paille de riz**

Échantillons	6	7	8	9	10	11
<b>%RHA/%Sable + %paille</b>	12/3+16	12/4,5+14,5	12/6+13	12/7,5+11,5	12/9+10	12/10,5+8,5
<b>Rc [MPa]</b>	0,44	0,56	0,31	1,29	2,06	1,29



**Figure 5: Evolution de la résistance mécanique en fonction de la quantité de paille de riz et du sable**

### Interprétation :

La figure 5 nous montre l'influence de l'ajout conjoint du sable et de paille dans la pâte.

- Pour 12/1,5+17,5 < %CBR/%Sable+%Paille < 12/6+13, on remarque que la teneur en sable peu élevée dans cette fourchette entraine les éprouvettes géopolymériques à une très faible résistance mécanique.  $R_c \approx 0,5$  MPa
- Pour %CBR/%Sable+%paille = 12/7,5+11,5, en élevant la teneur en sable, on remarque une évolution de la résistance à la compression :  $R_c = 1,29$  MPa.
- Pour %CBR/%Sable+%paille = 12/9+10, ce dosage en sable est optimum avec une résistance à la compression maximale :  $R_c = 2,06$  Mpa
- Pour %CBR/%Sable+%paille = 12/10,5+8,5, la résistance recommence à chuter :  $R_c = 1,29$  MPa.

Dans la suite de notre étude, nous utiliserons le dosage %CBR/%Sable+%paille = 12/9+10

### 2.1.2.3. Optimisation de la quantité de chaux et de métakaolin

D'après les essais effectués ci-dessus, on a pu obtenir le rapport molaire optimum  $R_m = 1,6$  et on garde cette valeur pour les essais qui vont suivre.

On a également optimisé les quantités de sable à 9 % et de paille à 10 %

a) Paramètres fixes pour une éprouvette :

- $R_m=1,6$
- Paille = 10 %
- Sable = 9 %
- Cendre de balle de riz (RHA) = 12 %
- Eau de gâchage = 19 %
- Liant (SS) = 35 %

On a pour la chaux et le métakaolin une quantité totale de 15 %.

On remplace progressivement le métakaolin par de la chaux.

Le tableau suivant nous montre la variation de la quantité de chaux et de métakaolin dans la pâte (aluminosilicate).

**Tableau 7: Variation de la quantité de métakaolin et de la chaux dans l'aluminosilicate de calcium**

Échantillons	12	13	14	15	16	17
<b>Métakaolin (%)</b>	13	12	11	9	8	7
<b>Chaux (%)</b>	2	3	4	6	7	8
<b>%RHA/%MK+%CH</b>	12/13+2	12/12+3	12/11+4	12/9+6	12/8+7	12/7+8

b) Résistances mécaniques

- Résistance à la Flexion

Le tableau suivant nous montre la résistance à la flexion en fonction du métakaolin et de la chaux dans l'aluminosilicate.

**Tableau 8: Résistance à la flexion en fonction du métakaolin et de la chaux dans l'aluminosilicate de calcium**

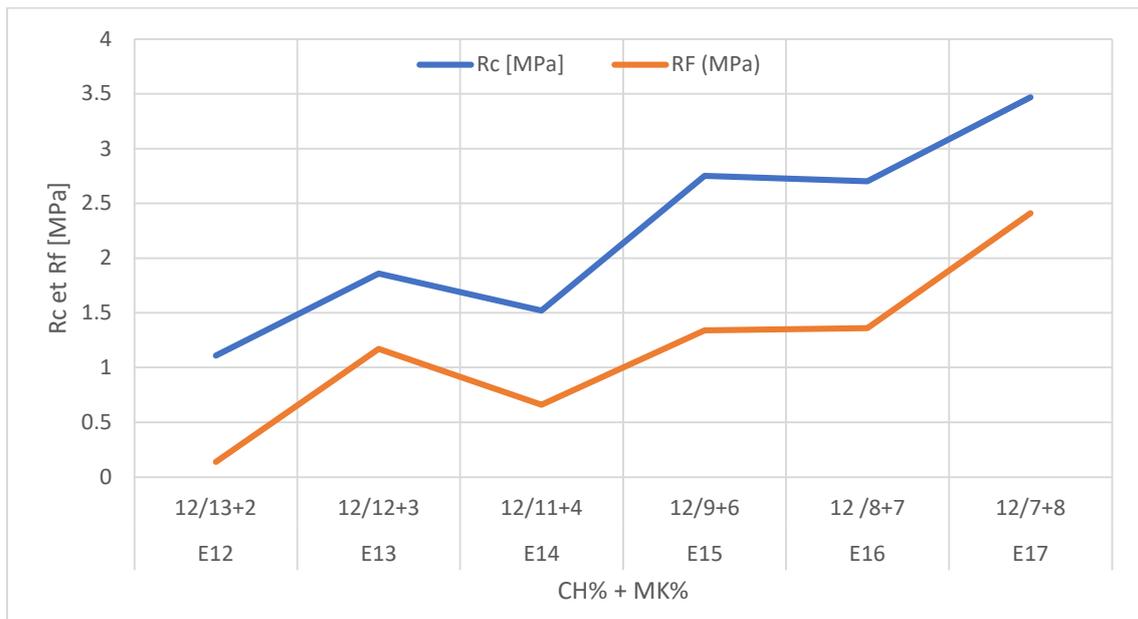
Échantillons	12	13	14	15	16	17
<b>%RHA/%MK+%CH</b>	12/13+2	12/12+3	12/11+4	12/9+6	12/8+7	12/7+8
<b>R<sub>F</sub> (MPa)</b>	0,14	1,17	0,66	1,34	1,36	2,41

- Résistance en compression

Le tableau 9 nous montre la résistance en compression en fonction du métakaolin et de la chaux dans l'aluminosilicate.

**Tableau 9: Résistance en compression en fonction du métakaolin et de la chaux dans l'aluminosilicate de calcium**

Échantillons	12	13	14	15	16	17
<b>%RHA/%MK+%CH</b>	12/13+2	12/12+3	12/11+4	12/9+6	12/8+7	12/7+8
<b>R<sub>c</sub> [MPa]</b>	1,11	1,86	1,52	2,75	2,70	3,47



**Figure 6: Evolution de la résistance mécanique en fonction du pourcentage de l'aluminosilicate de calcium**

#### Interprétation :

D'après la figure ci-dessus l'augmentation de l'ajout de chaux par rapport au métakaolin dans l'aluminosilicate améliore les performances de nos éprouvettes géopolymères.

- En augmentant progressivement le pourcentage de la chaux, les éprouvettes géopolymères ont une résistance mécanique optimale ( $R_F=2,41$  MPa ;  $R_c=3,47$  MPa) pour l'échantillon E17 (12/7+8) c'est-à-dire à 7 % de métakaolin et 8 % de chaux.
- Ceci nous montre que la chaux joue un rôle important dans la réaction de géopolymérisation. De plus, on a constaté que le temps de prise des éprouvettes diminue car le démoulage peut se faire en moins de 24h de gâchage.

#### 2.1.2.4. Optimisation de la quantité du liant (Silicate de soude) et de l'eau de gâchage

##### a) Paramètres fixes pour une éprouvette :

- $R_m=1,6$
- Chaux = 8 %
- Métakaolin = 7 %
- Cendre de balle de riz (RHA) = 12 %
- Paille de riz = 10 %
- Sable = 9 %

On a varié la quantité du liant SS : 41 % ; 39 % ; 37 % ; 33 % ; 31 % et 29 %

et la quantité de l'eau de gâchage : 13 % ; 15 % ; 17 % ; 21 % ; 23 % et 24 %

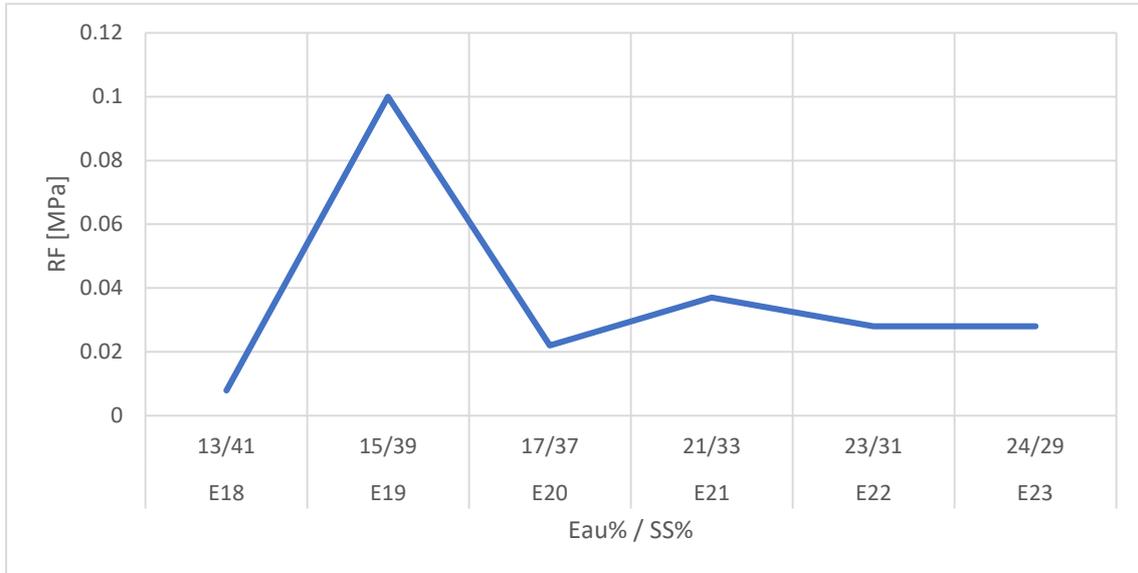
##### b) Résistances mécaniques

- Résistance à la traction par flexion

Le tableau 10 nous montre la résistance à la flexion en fonction du liant et de l'eau de gâchage.

**Tableau 10: Résistance à la flexion en fonction du liant**

Échantillons	18	19	20	21	22	23
<b>Eau% / Liant SS %</b>	13/41	15/39	17/37	21/33	23/31	24/29
<b>R<sub>F</sub> [MPa]</b>	0,008	0,1	0,022	0,037	0,028	0,028



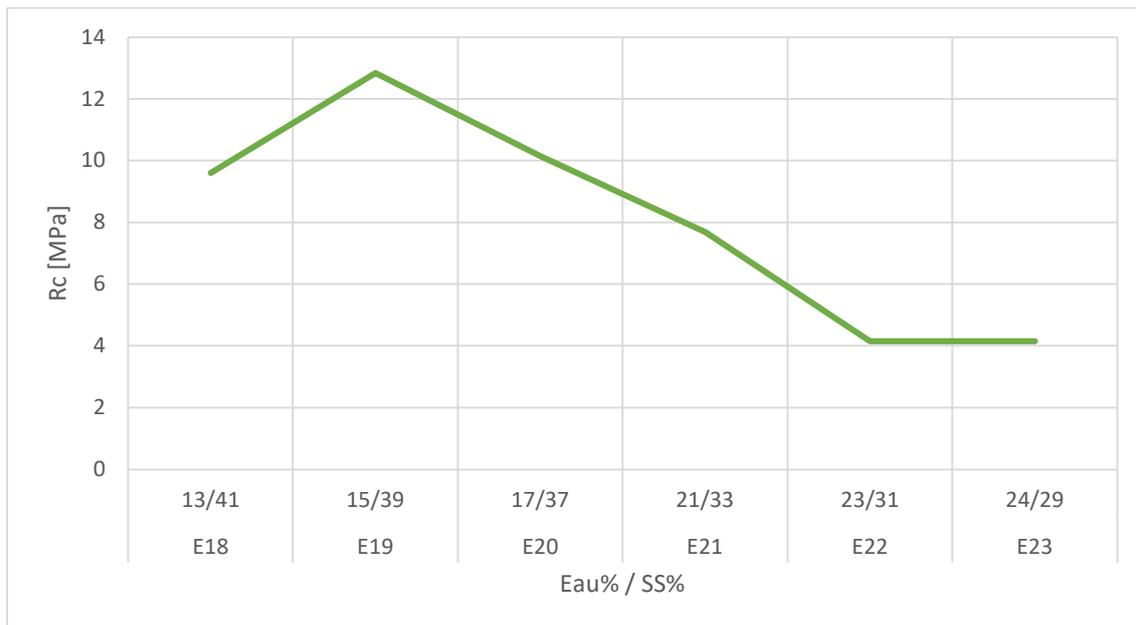
**Figure 7: Évolution de la résistance flexion en fonction de la quantité d'eau et du liant silicate de soude**

- Résistance en compression

Le tableau 11 nous montre la résistance en compression en fonction du liant et de l'eau de gâchage.

**Tableau 11: Résistance en compression en fonction du liant**

Échantillons	18	19	20	21	22	23
<b>Eau% / Liant SS %</b>	13/41	15/39	17/37	21/33	23/31	24/29
<b>R<sub>c</sub> [MPa]</b>	9,6	12,84	10,15	7,69	4,15	4,15



**Figure 8: Évolution de la résistance en compression en fonction de la quantité d'eau et du liant silicate de soude**

**Interprétation :**

- Nous remarquons (figure 8) que les résistances à la traction sont très faibles de l'ordre de 0,1MPa. Toutefois, on observe un maximum très net pour le rapport 15% d'eau / 39% de Silicate de Soude.
- La figure 9 nous informe que la résistance en compression maximale est obtenue également avec une teneur en silicate de soude à 39% avec 15% d'eau, c'est-à-dire qu'avec cette quantité, les aluminosilicates sont presque dissouts pour se transformer en gel.
- L'eau de gâchage joue un rôle très important et surtout pour la résistance mécanique car elle participe à la réaction de géopolymérisation à travers l'étape de dissolution.
- La teneur en eau maximale est de 15% et la résistance en compression optimale est égale à 12,84 MPa.
- La teneur optimale en silicate de soude est donc de 39% avec une quantité d'eau de gâchage de 15%, quantité juste nécessaire à la solubilisation des aluminosilicates.

**2.2. Dosages optimaux- Âges des éprouvettes**

**2.2.1. Mélange optimal**

Après avoir optimisé tous les paramètres, nous avons obtenu les meilleures performances mécaniques pour la composition optimale suivante :

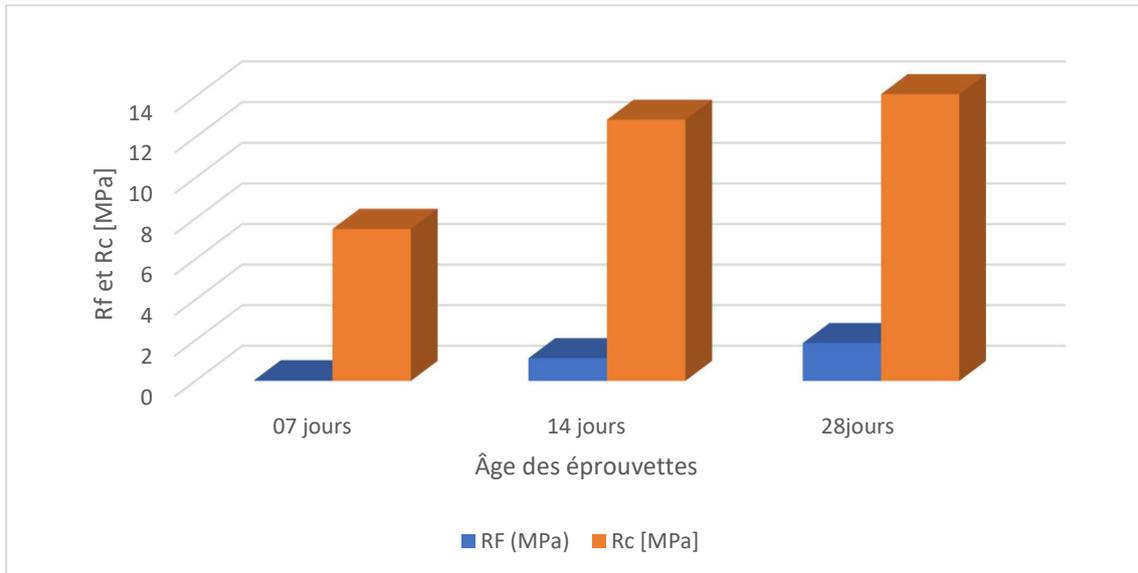
**Tableau 12: Composition optimale**

Matières premières	Chaux	Métakaolin	RHA	Paille de riz	Sable	Eau de gâchage	Silicate de Soude
<b>Pourcentage massique (%)</b>	8	7	12	10	9	15	39

2.2.2. Influence de l'âge des éprouvettes Ayant obtenu le mélange optimal, nous avons étudié 3 âges pour les éprouvettes : 07 jours, 14 jours et 28 jours. Les résultats obtenus sont regroupés dans le tableau suivant :

**Tableau 13: Influence de l'âge des éprouvettes**

Conservation à l'air	07 jours	14 jours	28 jours
<b>R<sub>F</sub> (MPa)</b>	0,037	1,125	1,87
<b>R<sub>c</sub> [MPa]</b>	7,49	13,86	14,12



**Figure 9: Évolution de la résistance mécanique en fonction de l'âge des éprouvettes**

**Interprétation :**

A 07 jours après le gâchage, la résistance à la compression de l'éprouvette est de 7,49 MPa. Au bout de 14 jours nous constatons une évolution rapide de la résistance. Elle passe à 12,86 MPa. On assiste à une évolution lente, puis à une montée brutale et enfin à une stabilisation de la résistance au bout de 28 jours avec Rc = 14,12 MPa. L'étude expérimentale nous montre que la résistance à la compression augmente quand les échantillons deviennent de plus en plus vieux.

2.3. Résultats des essais physiques

2.3.1. Retraits dimensionnel et volumique

Le tableau suivant nous montre le retrait dimensionnel et volumique du panneau géopolymère.

**Tableau 14: Retraits dimensionnels et volumiques du panneau géopolymère**

Jour	1 jour				28 jours				R <sub>d</sub> [%]	R <sub>v</sub> [%]
	L (mm)	l (mm)	h (mm)	V <sub>1</sub>	L (mm)	l (mm)	h (mm)	V <sub>28</sub>		
Ep 1	160	40	40	256000	158	38,6	39,3	239683	1,25	6,37
Ep 2	160	39,9	40	255360	158	38,5	39,2	238454	1,25	6,62
Ep 3	160	40	40	256000	158	39	40	246480	1,25	3,72
Ep 4	159	39,9	39,2	248689	158,5	38	37,6	226469	0,31	8,94
Ep 5	160	40	40	256000	160	39,3	40	251520	0	1,75
Ep 6	160	40	40	256000	158,5	38	40	240920	0,94	5,89
<b>Moyenne</b>									<b>0,83</b>	<b>5,55</b>

**Interprétation :**

En mesurant le retrait dans l'intervalle de 1 à 28 jours, nous constatons que nos panneaux géopolymères ne présentent que de faibles retraits car ils ne sont que de l'ordre de :

- Retrait linéaire : 0 à 1,25 % avec une moyenne de 0,83 %
- Retrait volumique : 1,75 à 8,94 % avec une moyenne de 5,55 %

2.3.2. Porosité Après avoir immergé nos éprouvettes dans l'eau, voici les résultats des essais de porosité :



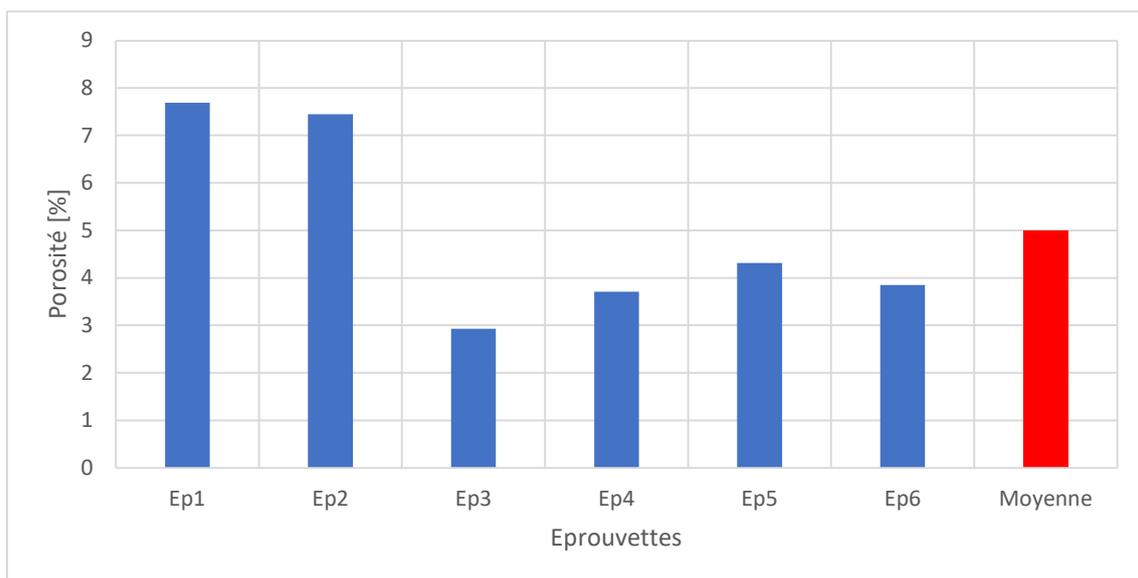
**Photo 6: Mesure de la porosité**

Le tableau suivant montre la variation de la porosité du panneau géopolymère.

**Tableau 15: Porosité du panneau géopolymère**

Éprouvette	M <sub>s</sub> (g)	M <sub>H</sub> (g)	Porosité (%)
------------	--------------------	--------------------	--------------

<b>Ep1</b>	351	378	7,69
<b>Ep2</b>	349	375	7,45
<b>Ep3</b>	376	387	2,93
<b>Ep4</b>	350	263	3,71
<b>Ep5</b>	348	363	4,31
<b>Ep6</b>	338	351	3,85
<b>Moyenne</b>	352	353	4,99



**Figure 10: Histogramme montrant la variation de la porosité du panneau géopolymère**

#### **Interprétation :**

Pendant son immersion dans l'eau durant 48 heures, le poids des éprouvettes a augmenté de 3,71 % à 7,69 %. Les éprouvettes n'absorbent donc pas beaucoup d'eau. Ce qui montre que les lacunes intergranulaires sont minimales. L'eau n'a pas beaucoup de lacunes à combler. Si nous compressons encore plus notre panneau lors de sa conception, on pourrait encore avoir de meilleurs résultats.

#### **2.3.3. Masse volumique apparente**

Nous présentons dans le tableau suivant la moyenne des masses volumiques des échantillons.

**Tableau 16: Masses volumiques apparentes du panneau géopolymère**

Éprouvettes	M <sub>s</sub> (g)	V (cm <sup>3</sup> )	ρ <sub>app</sub> (g/cm <sup>3</sup> )
N°1	351	239,683	1,464
N°2	349	238,454	1,464
N°3	376	246,480	1,525
N°4	350	226,469	1,545
N°5	348	251,520	1,386
N°6	338	240,920	1,403
Moyenne	<b>352</b>	<b>240,588</b>	<b>1,463</b>

### Interprétation

La moyenne des masses volumiques apparentes de nos éprouvettes est de 1,463 g/cm<sup>3</sup>.

### 2.4. Évaluation théorique de la conductivité thermique et de la résistance thermique des panneaux

#### 2.4.1. Conductivité thermique

En utilisant la formule du modèle de WOODSIDE et MESSMER :

$$\lambda = (1 - \epsilon) \lambda_l + \epsilon \lambda_g$$

$$\text{On a } \lambda_l = \lambda_{ss} = 0,06 \text{ W.m}^{-1} .\text{K}^{-1}$$

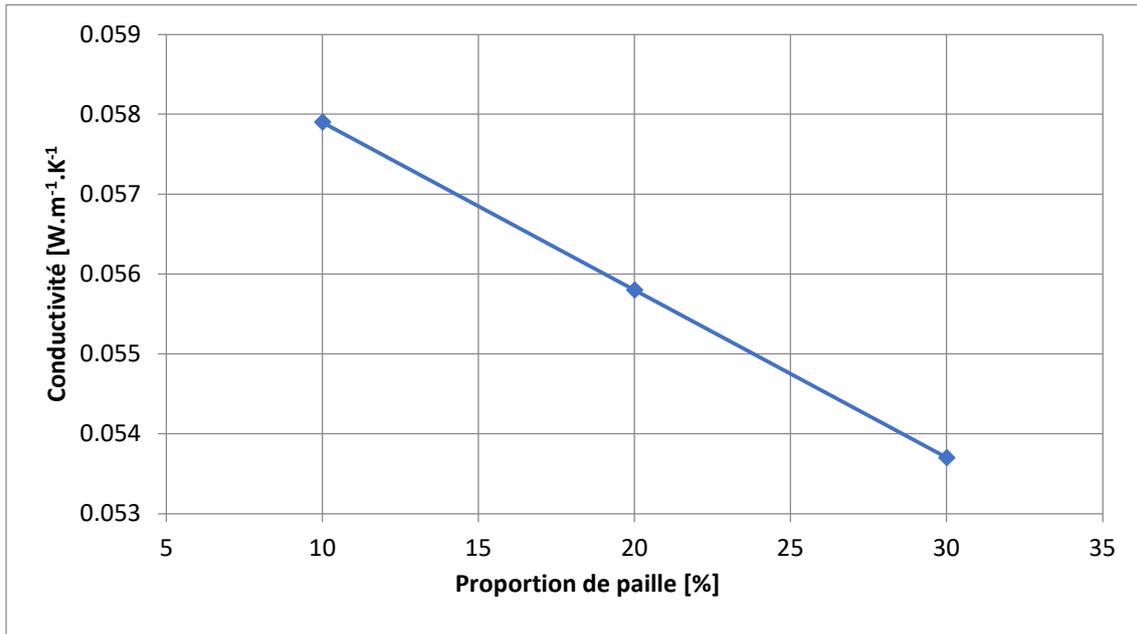
$$\lambda_g = \lambda_{paille} = 0,039 \text{ W.m}^{-1} .\text{K}^{-1}$$

Nous obtenons les résultats des calculs de la conductivité thermique des panneaux en fonction de la paille de riz dans le mélange :

**Tableau 17: Résultats de la conductivité thermique des panneaux composites**

Proportion de la paille de riz [%]	Conductivité thermique [W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]
<b>10</b>	0,0579
<b>20</b>	0,0558
<b>30</b>	0,0537

La figure suivante montre l'évolution de la conductivité thermique en fonction de la paille de riz dans le mélange :



**Figure 11: Évolution de la conductivité thermique en fonction de la paille de riz dans le mélange**

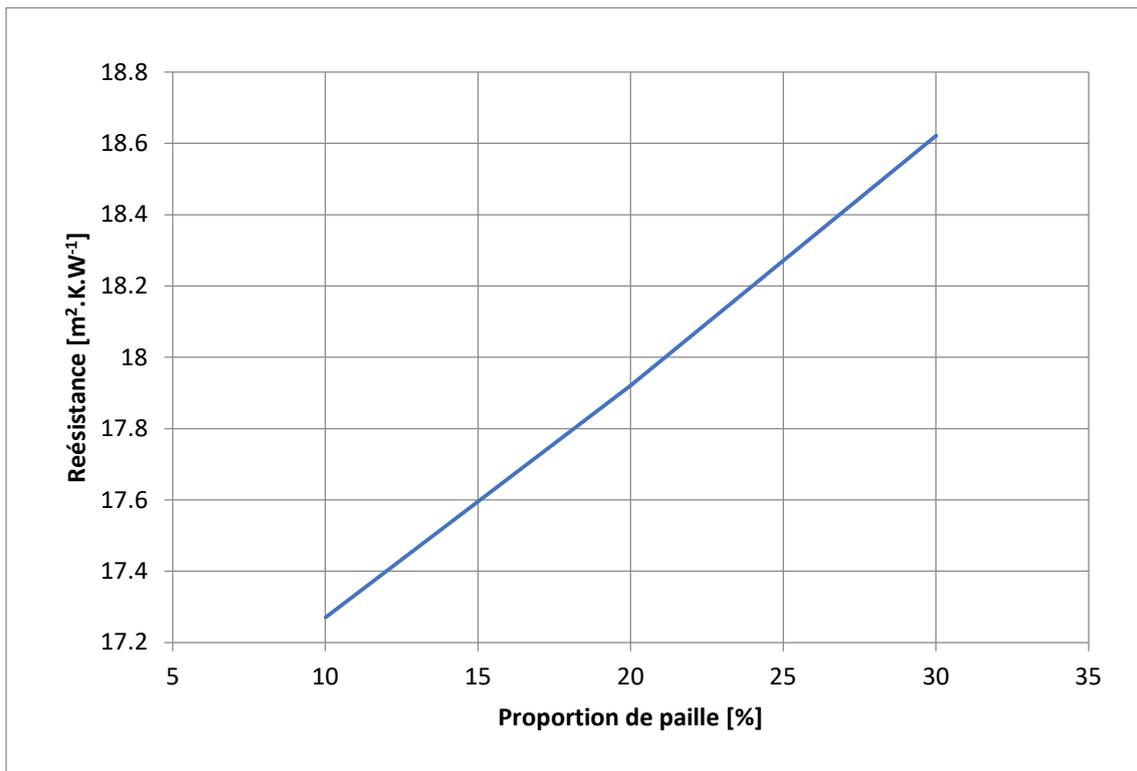
**Interprétation :**

D'après les calculs, la valeur de la conductivité thermique du panneau fabriqué est comprise entre 0,0537 à 0,0579 [ $W.m^{-1}.K^{-1}$ ]. On constate que les panneaux fabriqués présentent de très faibles conductivités thermiques. Cela signifie que le pouvoir isolant de notre matériau est élevé. La paille de riz joue un rôle important sur la conductivité thermique du panneau. Elle permet de retenir la chaleur en possédant une bonne capacité d'isolation thermique.

2.4.2. Résistance thermique D'après nos calculs, les résultats de la valeur de la résistance thermiques sont présentés par le tableau suivant :

**Tableau 18: Résultats de la résistance thermique des panneaux composites**

Proportion de la paille de riz [%]	Résistance thermique [ $m^2.K.W^{-1}$ ]
<b>10</b>	17,271
<b>20</b>	17,921
<b>30</b>	18,622



**Figure 12: Évolution de la résistance thermique en fonction de la paille de riz dans le mélange**

### Interprétation

D'après les calculs, la valeur de la résistance thermique est entre 17,271 à 18,622 [ $m^2.K.W^{-1}$ ]. Elle informe sur la capacité de l'isolant thermique à résister au froid et à la chaleur : plus la résistance thermique est élevée, plus l'isolant est efficace.

Lorsqu'on augmente la proportion de la paille de riz dans le mélange, la valeur de la conductivité thermique diminue tandis que la résistance thermique augmente.

### 2.5. Autres essais

#### 2.5.1. Test à l'acide

La photo suivante nous montre le résultat obtenu après avoir immergé l'éprouvette dans une solution d'acide chlorhydrique pendant près de 6 h de temps. L'acide chlorhydrique utilisé a une concentration de 5 %.



AVANT



APRES

**Photo 7: Test à l'acide**

### Interprétation

Après 6 h de temps immergé dans de l'acide chlorhydrique, le résultat nous montre que notre panneau supporte très bien le milieu acide. Ainsi, cela affirme que notre matériau possède des propriétés excellentes, même dans un environnement très agressif. Ceci est certainement dû aux propriétés du liant géopolymère.

#### 2.5.2. Résistance au feu

Il s'agit de mettre l'éprouvette au contact direct du feu jusqu'à ce qu'elle prenne feu. Pour cet essai, nous nous servons d'une bougie allumée.



**Photo 8: Essai de comportement au feu des panneaux de particule**

### Interprétation

Notre panneau présente une très faible propagation de flamme. Toutefois, à cause de la présence de carbone dans la matière première de base, il se carbonise petit à petit sous l'action du feu. En outre, on remarque une carbonisation lente. On peut dire que nos panneaux géopolymères sont peu sensibles au feu.

### 2.5.3. Adhérence des peintures



**Photo 9: Adhérence de la peinture**

La photo suivante présente le résultat du test à la peinture :

#### **Interprétation**

Comme on peut voir sur la photo ci-dessus, la peinture adhère bien au panneau. Son application sur le matériau géopolymère permet à ce dernier d'avoir une surface lisse et une bonne esthétique. Pour un meilleur accrochage de la peinture à venir, il faut légèrement le poncer. Il ne faut surtout pas oublier de retirer soigneusement la poussière de ponçage.

### 2.5.4. Résistance à l'eau

#### 2.5.4.1. Test d'immersion dans l'eau



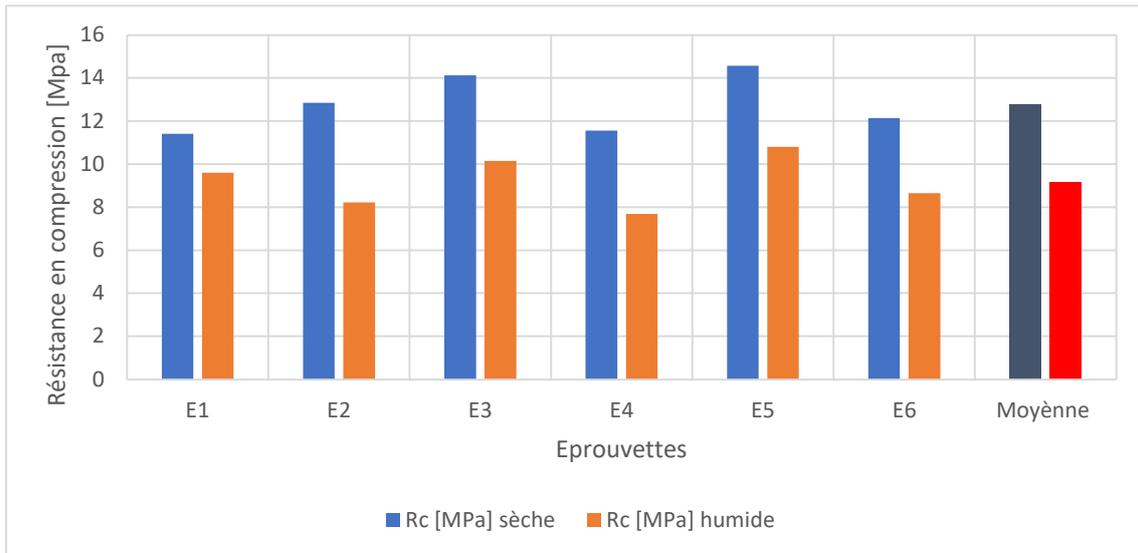
**Photo 10: Test d'immersion dans l'eau**

#### **Interprétation**

Après avoir immergé les éprouvettes dans l'eau pendant 48h, nous les avons soumises à des essais mécaniques en flexion et à la compression. Les résultats sont présentés dans le tableau qui suit :

**Tableau 19: Résultats des tests d'immersion dans l'eau**

Échantillons	E1	E2	E3	E4	E5	E6	Moyenne
Rc [MPa] sèche	11,41	12,84	14,12	11,56	14,56	12,13	<b>12,77</b>
Rc [MPa] humide	9,6	8,22	10,15	7,69	10,8	8,64	<b>9,18</b>



**Figure 13: Évolution de la résistance mécanique après immersion dans l'eau**

### Interprétation

Même après immersion dans l'eau, on constate qu'on obtient quand même de bonnes résistances mécaniques des éprouvettes. Cela signifie que notre panneau a une bonne résistance à l'humidité et que durant la confection, il est très important de bien compacter le mélange afin de ne pas avoir de lacunes intergranulaires.

#### 2.5.4.2. Test d'absorption d'eau par capillarité

Après avoir partiellement immergé notre échantillon dans de l'eau colorée, voici le résultat du test d'absorption d'eau par capillarité.



Début



Après 1 heure



Après 1 jour

**Photo 11: Absorption d'eau par capillarité**

## Interprétation

On a choisi de colorer l'eau afin de bien pouvoir distinguer la montée de l'eau par capillarité. En analysant les résultats nous pouvons constater que dès les premières minutes, le liquide s'élève rapidement sous l'effet de la capillarité. La forte tension superficielle du liquide fait qu'il remonte contre la gravité de l'échantillon. On remarque qu'au bout d'un certain temps, l'eau ne parvient pas jusqu'aux parties bien compactées. On a une mauvaise répartition des pores, le mélangeage et le compactage doit être effectués correctement. Les tests réalisés confirment que si le matériau est bien compacté, l'eau pénètre très difficilement.

## III. CONCLUSION

Notre idée était de développer des panneaux de matériaux composites en valorisant des déchets agricoles afin d'obtenir un produit de bonnes performances et qui présente un faible coût de production. Pour la fabrication de ce panneau, on a choisi le silicate de soude comme matrice. Nous avons tenté d'apporter une vision plus objective des méthodes de récupération des déchets rizicoles, toujours dans cette perspective écologique et économique. L'objectif de notre étude est de valoriser les pailles de riz et les balles de riz pour fabriquer un nouveau panneau en utilisant la technique de géopolymérisation. Après des études bibliographiques approfondies, nous avons effectués des essais expérimentaux pour mieux comprendre et avoir de meilleurs résultats.

Les résultats expérimentaux nous montrent que les éprouvettes panneaux géopolymères atteignent une résistance à la compression de l'ordre de 14.12 MPa à 28 jours en milieu sec. Les premiers résultats sont tout de même encourageants, car les performances obtenues peuvent être améliorées.

## REFERENCES

- [1] Marcellin, T. S. I. L. A. V. I. R. I. N. A., et al. (2024, July). CONSEQUENCES NEGATIVES DE LA DESTRUCTION DE L'ENVIRONNEMENT SUR LES ACTIVITES AGRICOLES ET DE L'ECONOMIE, SOCIETE A MADAGASCAR, CAS DE CHANGEMENT CLIMATIQUE. In *Publisher. agency: Proceedings of the 6th International Scientific Conference «Research Retrieval and Academic Letters»(July 4-5, 2024). Warsaw, Poland, 2024. 121p* (p. 79). University of Warmia and Mazury in Olsztyn.
- [2] ECOLOGIQUE, G., & DE MADAGASCAR, C. A. S. ANDRIAMAHEFA David Fitiavana Noël.
- [3] N. Fiononana, « Contribution à la fabrication des matériaux composites à base de latérites et de balles de riz », Mémoire de Master, Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo, 2016.
- [4] R. A. F. Rakotoarimanana, « Essai de fabrication d'un ciment par le procédé de géopolymérisation », Mémoire de Master, 2007.
- [5] R. Jose, « Étude et essai de fabrication d'un matériau géopolymère anti-feu à base de métakaolin, silicate de soude et de cendre de balle de riz », Mémoire de Master, Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo 2019.
- [6] 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 », Thèse de doctorat, Université d'Antananarivo, École Supérieure Polytechnique d'Antananarivo, 2012.