

# *Etude De Formulation D'un Beton Fibre Géopolymère Dans Le Cadre De L'eco-Construction Des Bâtiments*

RANDRIANJATOVO Andréas<sup>1</sup>, KOERA Rasoloniaina Antoine<sup>2</sup>, RABETOKONTANY Nantenaina<sup>3</sup>,  
RAKOTOARINDRIAKA Solofaly Philbert<sup>3</sup>, RATSIMBAZAFY Hery Mikaela<sup>3</sup>

<sup>2</sup>Université d'Antananarivo

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

<sup>1</sup>Équipe d'Accueil Doctorale en Ingénierie des Matériaux et des Matières Premières

<sup>3</sup>Centre National de Recherches Industrielle et Technologique, Département Matériaux et Génie Civil <sup>4</sup>Office des  
Mines Nationales et des Industries Stratégiques

Auteur Correspondant : RANDRIANJATOVO Andréas, [andreas.resanda@gmail.com](mailto:andreas.resanda@gmail.com)



**Résumé** – Cette étude porte sur l'influence du rapport molaire du silicate de soude  $n(\text{SiO}_2)/n(\text{Na}_2\text{O})$  et du mode de conservation sur les propriétés physiques et mécaniques d'un béton fibré géopolymère à base de métakaolin et de cendre de balle de riz, activé alcalinement et partiellement enrichi en chaux. Les formulations étudiées présentent des rapports du silicate de soude  $n(\text{SiO}_2)/n(\text{Na}_2\text{O})$  compris entre 1,25 et 2,50, avec des éprouvettes conservées à l'eau et à l'air libre, et testées à différents âges.

Les résultats montrent que les résistances mécaniques augmentent avec le rapport silice/soude jusqu'à une valeur optimale de 2,00, pour laquelle la résistance à la compression atteint 12,25 MPa pour le béton témoin et 12,18 MPa pour le béton fibré à 4 % de fibres de bambou à 7 jours. Au-delà de cette valeur, une diminution des performances est observée, avec une résistance en compression de 11,05 MPa pour un rapport de 2,50.

La résistance à la traction par flexion suit la même tendance, passant de 1,95 MPa (rapport molaire du silicate de soude 1,25) à 2,80 MPa pour le béton non fibré et de 2,10 MPa à 3,60 MPa pour le béton fibré à 4 % de bambou lorsque le rapport silice/soude augmente jusqu'à 2,00. Cette amélioration est accompagnée d'une réduction de la porosité, qui diminue de 14,8 % à 10,6 %, et du retrait linéaire, passant de 0,25 mm/m à 0,18 mm/m.

Par ailleurs, la conservation des éprouvettes dans l'eau conduit à des résistances mécaniques nettement supérieures à celles conservées à l'air libre, traduisant une meilleure poursuite des réactions de géopolymérisation. Ces résultats confirment le rôle clé de la formulation chimique et du mode de cure dans l'optimisation des performances du béton géopolymère fibré.

**Mots clés** : Béton fibré géopolymère ; Métakaolin ; Cendre de balle de riz ; Rapport molaire  $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$  ; Mode de conservation ; Propriétés mécaniques

**Abstract** – This study investigates the influence of the molar ratio  $n(\text{SiO}_2)/n(\text{Na}_2\text{O})$  and the curing conditions on the physical and mechanical properties of a fiber-reinforced geopolymer concrete based on metakaolin and rice husk ash, alkali-activated and partially enriched with lime. The investigated formulations cover  $n(\text{SiO}_2)/n(\text{Na}_2\text{O})$  ratios ranging from 1.25 to 2.50, with specimens cured in water and in air and tested at different ages.

The results indicate that mechanical strengths increase with the silicate modulus up to an optimal value of 2.00. At this ratio, the compressive strength reaches 12.25 MPa for the plain geopolymer concrete and 12.18 MPa for the concrete reinforced with 4 wt.% bamboo fibers at 7 days. For higher ratios, a slight decrease is observed, with compressive strength dropping to 11.05 MPa at a ratio of 2.50.

Flexural tensile strength shows a similar trend, increasing from 1.95 MPa to 2.80 MPa for plain concrete and from 2.10 MPa to 3.60 MPa for fiber-reinforced concrete as the molar ratio increases from 1.25 to 2.00. This mechanical improvement is correlated with a reduction in porosity from 14.8 % to 10.6 % and a decrease in linear shrinkage from 0.25 mm/m to 0.18 mm/m.

Moreover, water curing significantly enhances mechanical performance compared to air curing, highlighting the importance of curing conditions in promoting geopolymerization reactions. These findings confirm that both chemical formulation and curing mode are key parameters for optimizing the performance of fiber-reinforced geopolymer concrete.

**Key words:** Fiber-reinforced geopolymer concrete; Metakaolin; Rice husk ash; SiO<sub>2</sub>/Na<sub>2</sub>O molar ratio; Curing conditions; Mechanical properties.

## I. Introduction :

Le secteur du bâtiment et des travaux publics constitue l'un des principaux contributeurs aux émissions mondiales de gaz à effet de serre, en raison notamment de l'utilisation massive du ciment Portland, dont la production est fortement consommatrice d'énergie et responsable d'environ 7 à 8 % des émissions globales de CO<sub>2</sub> [1]. Face aux enjeux environnementaux actuels et à la nécessité de promouvoir des pratiques constructives durables, la recherche de matériaux alternatifs à faible empreinte carbone s'impose comme une priorité dans le domaine de l'éco-construction des bâtiments.

Dans ce contexte, le béton géopolymère suscite un intérêt croissant en tant que matériau liant innovant, obtenu par l'activation alcaline de matériaux riches en silice et en oxydes d'aluminium, d'origine naturelle ou issus de sous-produits industriels [2]. Comparé au béton conventionnel, ce type de béton présente des performances supérieures en termes de résistance aux températures élevées, de durabilité en milieux agressifs et acides, ainsi qu'une réduction significative des émissions de CO<sub>2</sub> associées à sa fabrication [3,4]. Par ailleurs, l'incorporation de fibres dans la matrice géopolymère permet d'améliorer notablement les propriétés mécaniques, notamment la résistance à la traction, la ténacité et le comportement post-fissuration, renforçant ainsi l'aptitude du matériau à des applications structurelles exigeantes [5].

À Madagascar, la disponibilité abondante de ressources minérales locales telles que les argiles, les cendres volcaniques et certains résidus industriels offre un potentiel considérable pour le développement de bétons géopolymères adaptés au contexte local. La valorisation de ces matières premières contribue non seulement à la réduction des coûts liés à l'importation du ciment, mais également à la promotion d'une construction durable, économiquement et environnementalement viable. Cette approche s'inscrit pleinement dans une dynamique globale visant à répondre à la demande croissante en matériaux de construction performants, durables et respectueux de l'environnement, tout en tenant compte des spécificités régionales et des besoins des pays en développement [6].

## II. Matériels et matières premières :

### 2.1 Les matériels utilisés :

Dans le cadre de cette étude expérimentale, différents équipements et instruments ont été mobilisés afin de garantir la fiabilité, la sécurité et la reproductibilité des essais réalisés. Ces matériels ont été utilisés pour la préparation des matières premières, la formulation du béton fibré géopolymère, la fabrication des éprouvettes ainsi que pour la caractérisation chimique et mécanique des matériaux. Le Tableau suivant présente l'ensemble des matériels employés et leurs principales fonctions au cours de cette étude :

*Tableau 1: Liste des matériels et leurs utilisations*

| MATERIELS                         | UTILISATIONS                                                     |
|-----------------------------------|------------------------------------------------------------------|
| Balance électronique de précision | Pesage précis des différents constituants                        |
| Broyeur à boulets                 | Broyage fin des poudres (kaolin calciné, cendre de balle de riz) |
| Cuvettes en inox                  | Préparation et manipulation de la solution de silicate de sodium |
| Cuvettes en plastique             | Stockage des matériaux pesés et mélange à sec des constituants   |

|                                      |                                                                                        |
|--------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|
| Cuillères en inox                    | Manipulation et dosage des matériaux solides                                           |
| Four                                 | Calcination des poudres, notamment le kaolin                                           |
| Gants en silicone                    | Protection individuelle lors de la manipulation de la soude, fortement corrosive       |
| Malaxeur                             | Malaxage homogène des constituants du béton                                            |
| Machine d'essais mécaniques          | Réalisation des essais de flexion et de compression                                    |
| Marteau                              | Concassage des graviers avant tamisage                                                 |
| Moules prismatiques et cylindriques  | Moulage des éprouvettes de béton                                                       |
| Pied à coulisse                      | Mesurage dimensionnel des éprouvettes prismatiques                                     |
| Spectromètre de fluorescence X (XRF) | Analyse chimique des matières premières                                                |
| Tables vibrantes                     | Compactage et élimination des vides d'air du béton frais                               |
| Tamis                                | Tamisage des poudres ( $\leq 0,4$ mm) et des granulats : sable (0/4) et graviers (4/8) |
| Tamiseuse                            | Réalisation de l'analyse granulométrique des granulats                                 |

## 2.2 Les matières premières et matériaux nécessaires :

Les matières premières et matériaux utilisées pour l'élaboration et la fabrication du béton fibré géopolymère étudié dans ce travail ont été soigneusement sélectionnées en fonction de leur disponibilité, de leurs propriétés physico-chimiques et de leur adéquation avec les objectifs de l'étude. L'ensemble des matériaux employés est présenté ci-après :

- **Kaolin**, utilisé comme matériau précurseur, constituant une source de silice et d'oxydes d'aluminium, et transformé en métakaolin par calcination préalable ;
- **Silice issue de la calcination de balles de riz**, utilisée comme source alternative de silice réactive ;
- **Chaux éteinte**, incorporée afin de favoriser certaines réactions et d'améliorer le développement des propriétés mécaniques ;
- **Soude caustique (NaOH)**, employée pour la préparation de la solution alcaline et la fabrication du silicate de sodium ;
- **Gravillons**, utilisés comme granulats grossiers ;
- **Sable**, utilisé comme granulats fin ;
- **Bambou naturel pour extraire les fibres de bambou**, utilisées comme renfort naturel afin d'améliorer la ténacité et le comportement post-fissuration ;
- **Eau potable fournie par la JIRAMA**, utilisée pour la préparation des solutions et le malaxage des constituants.

## 2.3. Préparation des matières premières spécifiques :

### 2.3.1 Préparation du kaolin :

Le kaolin utilisé dans cette étude, fourni par la société PROCHIMAD, était une poudre pré-broyée présentant une granulométrie contrôlée d'environ 40  $\mu\text{m}$ , assurant une homogénéité et une réactivité adaptées à son utilisation comme matériau précurseur du béton géopolymère.

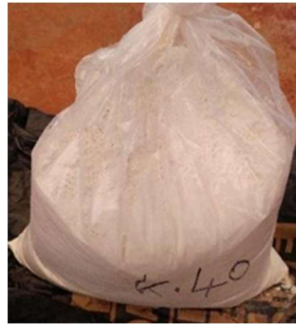
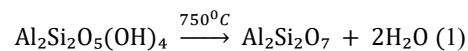


Figure 1: Le kaolin broyé d'environ 40 µm de diamètre

Le kaolin a été transformé en métakaolin par calcination contrôlée dans un four électrique à 750 °C, après un préchauffage de 3 à 4 heures, avec un maintien isotherme de 2 heures permettant la déshydroxylation complète du matériau, selon la réaction chimique suivante :



### 2.3.2 Préparation de la cendre de balle de riz (RHA : Rice Husk Ash) :

Cette préparation vise à obtenir une cendre riche en silice fine et réactive. Pour atteindre cet objectif, les opérations suivantes ont été mises en œuvre :



Figure 2: Processus de préparation du RHA

#### 2.3.2.1 Incinération de la balle de riz :

La calcination de la balle de riz a été réalisée dans un incinérateur cubique en briques non hourdées (1 m × 1 m × 1 m, épaisseur 22 cm), équipé d'un couvercle métallique avec cheminée et d'une ouverture inférieure assurant l'aération et le contrôle thermique. La combustion a été menée à environ 600 °C afin d'obtenir des cendres de balle de riz riches en silice fine et réactive.



Figure 3: Incinérateur pour la balle de riz

Après introduction de la quantité requise de balle de riz dans l'incinérateur, la calcination a été réalisée en deux étapes successives afin d'obtenir des cendres riches en silice réactive.

- La première étape correspond à une phase de carbonisation, durant laquelle la balle de riz devient noirâtre, et a été maintenue pendant environ 20 heures.



*Figure 4: Etape de carbonisation des balles de riz*

- La seconde étape consiste en une combustion lente, au cours de laquelle les produits issus de la carbonisation se transforment progressivement en cendres de couleur grise, caractérisées par une silice majoritairement amorphe ; cette phase a été conduite pendant environ 20 heures.



*Figure 5: Obtention de cendre de couleur gris riche en silice*

#### **2.3.2.2 Broyage de la cendre de balles de riz :**

Le broyage vise à réduire les cendres de balle de riz en une poudre fine afin d'augmenter leur réactivité.

Dans cette étude, l'activation mécanique a été réalisée à l'aide d'un broyeur à boulets, dans lequel les cendres et les billes de broyage ont été introduites, puis broyées pendant une durée de 6 heures.



*Figure 6: Broyeur a boulet du CNRIT Fiadanana*



*Figure 7: Extrait de RHA broyé*

### **2.3.2.3 Le tamisage :**

Le tamisage des cendres de balle de riz (RHA) a été réalisé afin d'éliminer les impuretés, notamment les particules insuffisamment ou excessivement calcinées. Un tamis normalisé de 0,4 mm d'ouverture a été utilisé pour obtenir une silice fine et hautement réactive.



*Figure 8: Tamisage du RHA*

### **2.3.3 Préparation des fibres de bambou :**

L'objectif de la préparation des fibres de bambou est d'obtenir des fibres propres, bien séparées, de dimensions contrôlées et présentant une surface adaptée, afin d'améliorer leur compatibilité avec la matrice géopolymère, d'assurer une bonne dispersion lors du malaxage et de renforcer les propriétés mécaniques du béton, notamment la ténacité et le comportement post-fissuration.

#### **2.3.3.1 Enlèvement des nœuds du bambou :**

Après la récolte, les tiges de bambou ont été découpées entre les nœuds à l'aide d'une scie, puis fendues longitudinalement afin d'obtenir les éléments destinés à la préparation des fibres.



*Figure 9: Enlèvement des nœuds de bambou*

### **2.3.3.2 Confection des bâtonnets :**

Après élimination de l'épiderme des tiges de bambou, celles-ci ont été découpées afin d'obtenir des lamelles de dimensions contrôlées, utilisées pour la confection des bâtonnets de fibres.



*Figure 10: Enlèvement des épidermes et confection des bâtonnets*

### **2.3.3.3 Préparation de la solution de soude et immersion des lamelles (bâtonnets) :**

Une solution de soude a été préparée en dissolvant 60 g de NaOH dans 4 L d'eau. Les lamelles de bambou ont ensuite été immergées dans cette solution pendant une durée de 16 heures, afin d'affaiblir les liaisons entre la cellulose, la lignine et l'hémicellulose, facilitant ainsi la préparation des fibres.



*Figure 11: Lamelles de bambou immergées dans la solution de soude*

### **2.3.3.4 Prélèvement, rinçage et broyage des bâtonnets :**

À l'issue du temps d'immersion, les bâtonnets ont été retirés de la solution alcaline en utilisant des gants de protection en raison du caractère corrosif de la soude. Ils ont ensuite été soigneusement rincés à l'eau afin de neutraliser l'excès de soude, puis broyés mécaniquement à l'aide d'un marteau pour éliminer les résidus alcalins et favoriser la séparation des différents constituants de la lamelle.

Après le broyage, les bâtonnets ont été peignés à l'aide d'un peigne afin de séparer efficacement les fibres et de faciliter leur extraction.



*Figure 12: Broyage mécanique des bâtonnets à l'aide d'un marteau*

#### **2.3.3.5 Rinçage et séchage des fibres :**

Un second rinçage des fibres a été effectué afin de réduire la basicité résiduelle liée à la présence de soude et d'optimiser leur incorporation dans la matrice polymère. Les fibres ont ensuite été séchées à l'air libre pendant 2 à 3 jours, selon les conditions climatiques, avec un peignage périodique toutes les 4 heures afin d'assurer une bonne séparation des fibres.



*Figure 13: Fibre bien séparée après le peignage suivi d'un séchage*

#### **2.3.3.6 Découpage des fibres :**

Après séchage complet, les fibres ont été découpées à une longueur comprise entre 14 et 25 mm, afin de les rendre aptes à leur incorporation lors de la mise en œuvre du béton géopolymère.



*Figure 14: Extrait de fibres de bambou découpées prêt à l'emploi*

#### **2.3.4 La chaux éteinte :**

La chaux éteinte utilisée dans cette étude est un produit local, commercialisé sous la dénomination CHAUX BOUTSIK, sélectionné en raison de sa disponibilité sur le marché national et de son adéquation aux objectifs de la recherche.



*Figure 15: La chaux éteinte utilisée*

### 2.3.5 La soude caustique :

La soude caustique (hydroxyde de sodium, NaOH) utilisée dans cette étude, de pureté supérieure à 98 %, a été fournie par la société SPCI Madagascar et employée pour la préparation de la solution alcaline nécessaire à la fabrication du silicate de sodium.



*Figure 16: La soude caustique utilisée de SPCI*

### 2.3.6 Gravillon :

Un gravillon de classe granulaire 4/8 a été utilisé, ce choix ayant été motivé par la facilité de mise en œuvre et l'amélioration de l'homogénéité du béton.



*Figure 17: Le gravillon de classe granulaire 4/8 utilisé*

### 2.3.7 Sable :

Le sable utilisé est un sable de rivière de classe granulométrique 0/4, choisi pour sa propreté, sa granulométrie adaptée et sa compatibilité avec la formulation du béton géopolymère.



Figure 18: Le sable de rivière de classe granulométrique 0/4 utilisé

### 2.3.8 Eau de la JIRAMA :

L'eau utilisée pour la préparation des solutions et le malaxage des constituants est une eau potable fournie par la JIRAMA, répondant aux exigences usuelles pour les matériaux de construction.

### III. Fabrication de béton fibré géopolymère :

L'étude expérimentale a été réalisée sur deux types d'éprouvettes : des éprouvettes cylindriques de 50 mm de diamètre et 100 mm de hauteur, destinées aux essais de résistance à la compression, et des éprouvettes prismatiques de 160 mm de longueur, 40 mm de largeur et 40 mm de hauteur, utilisées pour la détermination de la résistance à la traction par flexion.

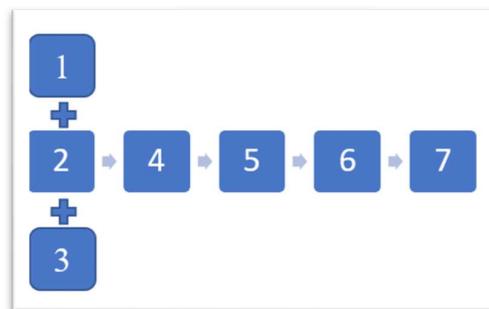


Figure 19: Processus de fabrication des éprouvettes de béton géopolymère

- 1 : Préparation des Aluminosilicates ;
- 2 : Préparation des agrégats et les fibres ;
- 3 : Préparation du silicate de sodas ;
- 4 : Mélangeages des constituants ;
- 5 : Dressage des moules ;
- 6 : Vibration des moules ;
- 7 : Démoulage et séchage des éprouvettes en temps voulu.

### 3.1 Préparation des aluminosilicates :

Dans un premier temps, les quantités requises de cendre de balle de riz (RHA), de métakaolin et de chaux vive sont soigneusement pesées. Ces constituants sont ensuite mélangés à sec dans une cuvette propre jusqu'à l'obtention d'un mélange homogène et uniforme.



*Figure 20: Obtention de l'homogénéité de l'aluminosilicate*

### 3.2 Préparation des agrégats et les fibres :

Par ailleurs, les quantités prescrites de sable, de gravillon et de fibres de bambou sont d'abord pesées avec précision. Ces constituants sont mélangés à sec dans une seconde cuvette propre. Le mélange d'aluminosilicates précédemment préparé est ensuite incorporé à l'ensemble, puis l'ensemble est homogénéisé à sec afin d'assurer une répartition uniforme de tous les constituants.



*Figure 21: Mélangeage de l'aluminosilicate avec les agrégats et les fibres*

### 3.3 Préparation du silicate de soude :

Après le pesage des constituants nécessaires, à savoir la cendre de balle de riz (RHA), la soude caustique (NaOH) et l'eau potable de la JIRAMA, l'eau est d'abord versée dans une cuvette en inox, puis la soude est ajoutée progressivement sous agitation à l'aide d'une cuillère en inox. Cette opération provoque un échauffement du récipient en raison du caractère exothermique de la dissolution de la soude.

La RHA est ensuite introduite progressivement dans la solution obtenue. Le mélange devient alors fortement exothermique et présente un phénomène de moussage, dû à la réaction de la soude avec la silice présente. Cette étape nécessite une vigilance particulière en raison des risques de brûlure.

Après agitation complète, le mélange est laissé au repos afin de permettre un refroidissement partiel. La solution de silicate de soude ainsi obtenue est alors prête à être utilisée comme solution activatrice.



*Figure 22: Processus de fabrication du silicate de soude*

### 3.4 Mélangeages des constituants :

Après avoir pesé la quantité requise de silicate de soude, l'eau de gâchage préalablement mesurée est ajoutée progressivement à cette solution. Le mélange est ensuite homogénéisé pendant quelques minutes à l'aide d'une cuillère en inox jusqu'à l'obtention d'une solution uniforme. Cette solution activatrice est alors incorporée dans la cuvette contenant le mélange sec d'aluminosilicates, d'agrégats et de fibres. L'ensemble est d'abord mélangé manuellement, puis soumis à un malaxage mécanique afin d'assurer une homogénéité optimale du béton géopolymère.



*Figure 23: Mélangeage de tous les constituants de notre béton fibré géopolymère*

### 3.5 Mise en moule des éprouvettes :

Cette étape consiste à couler le béton frais obtenu dans des moules prismatiques et cylindriques, en réalisant trois éprouvettes identiques pour chaque formulation étudiée.



*Figure 24: Dressage du béton frais dans les moules*

### 3.6 Vibrage des éprouvettes :

Cette étape est essentielle dans le processus de fabrication, car elle vise à éliminer les vides d'air présents dans le béton frais. Les moules remplis sont placés sur une table vibrante pendant une durée de 60 secondes afin d'assurer une compacité optimale et de réduire au minimum la porosité interne du béton.



Figure 25: Vibrage des éprouvettes sur la plaque vibrante

### 3.7 Démoulage et conservation des éprouvettes en temps voulu :

Le démoulage des éprouvettes est effectué 72 heures après le coulage, une fois la prise initiale du béton achevée. La conservation est réalisée soit à l'air libre, soit par immersion dans l'eau, selon les paramètres étudiés. Les éprouvettes ainsi préparées sont ensuite prêtes pour les essais physiques, mécaniques et chimiques.



Figure 26: Séchage des éprouvettes

## 1. IV. Résultats et discussions :

La formulation joue un rôle déterminant dans les propriétés chimiques, physiques, mécaniques et thermiques du béton géopolymère fibré. L'objectif de cette étude est de développer un matériau présentant une bonne stabilité face aux agressions chimiques, aux températures élevées, et répondant aux exigences de l'éco-construction, tout en garantissant des performances mécaniques et de durabilités satisfaisantes.

Afin de mener rigoureusement cette étude et d'optimiser la qualité du béton géopolymère fibré élaboré, deux catégories de paramètres ont été considérées : les paramètres fixes et les paramètres variables.

Les paramètres suivants ont été maintenus constants pour l'ensemble des formulations étudiées :

- Température de calcination de l'argile kaolinique : 750 °C pendant 3 h ;
- Température d'incinération de la balle de riz : 600 °C ;
- Finesse du métakaolin : inférieure à 0,16 mm (160 µm) ;
- Finesse de la cendre de balle de riz : inférieure à 0,16 mm (160 µm) ;
- Température de préparation du silicate de soude : 100 °C pendant 5 minutes ;

- La masse de l'aluminosilicate (RHA + MK + Chaux éteinte) : 70g ;
- Quantités fixes des constituants pour la confection des éprouvettes : sable : 281,6g ; gravillon : 563,2g ; quantité d'eau de gâchage : 88g ;
- Le mode de conservation des éprouvettes : dans l'eau ;
- Le pourcentage des fibres de bambou à incorporer : 4% ;

Les paramètres étudiés et faisant l'objet de variations sont les suivants :

- Le rapport molaire silice/soude :  $n(\text{SiO}_2)/n(\text{Na}_2\text{O})$  ;
- L'âge et la conservation des échantillons : 7j, 14j, 28j ; à l'air libre et dans l'eau.

#### 4.1 Influence du rapport molaire $n(\text{SiO}_2)/n(\text{Na}_2\text{O})$ :

Nous avons étudié six formulations en fonction de la valeur du rapport molaire du silicate de soude :

$$\frac{n\text{SiO}_2}{n\text{Na}_2\text{O}} = 1,25; 1,50; 1,75; 2; 2,25; 2,50 \quad (2)$$

Les éprouvettes ont été faites en fixant les paramètres variables suivants :

- Le rapport molaire silice/alumine  $\frac{n\text{SiO}_2}{n\text{Al}_2\text{O}_3} = 3,86$  ;
- Le rapport molaire chaux/métakaolin  $\frac{n\text{CaO}}{n\text{MK}} = 2,9$  ;
- Le rapport molaire silicate de soude/métakaolin  $\frac{n\text{SS}}{n\text{MK}} = 0,67$  ;
- L'âge de l'échantillon : 7 jours ;
- Les pourcentages des fibres à incorporer sont respectivement : 0% (témoin) et 4% de fibre de bambou ;
- Le mode de conservation des échantillons : dans l'eau.

Les résultats obtenus sont regroupés dans les tableaux suivants :

##### 4.1.1 Influence du rapport molaire $n(\text{SiO}_2)/n(\text{Na}_2\text{O})$ sur la résistance à la compression :

Tableau 2: Résistance à la compression (Rc) en fonction du rapport molaire du silicate de soude

| Rapport SiO <sub>2</sub> /Na <sub>2</sub> O | Rc – Témoin (0%) en [MPa] | Rc – 4% Bambou en [MPa] |
|---------------------------------------------|---------------------------|-------------------------|
| 1,25                                        | 7,30                      | 7,25                    |
| 1,50                                        | 8,17                      | 8,08                    |
| 1,75                                        | 10,85                     | 10,52                   |
| 2,00                                        | 12,25                     | 12,18                   |
| 2,25                                        | 11,98                     | 11,88                   |
| 2,50                                        | 11,05                     | 10,92                   |

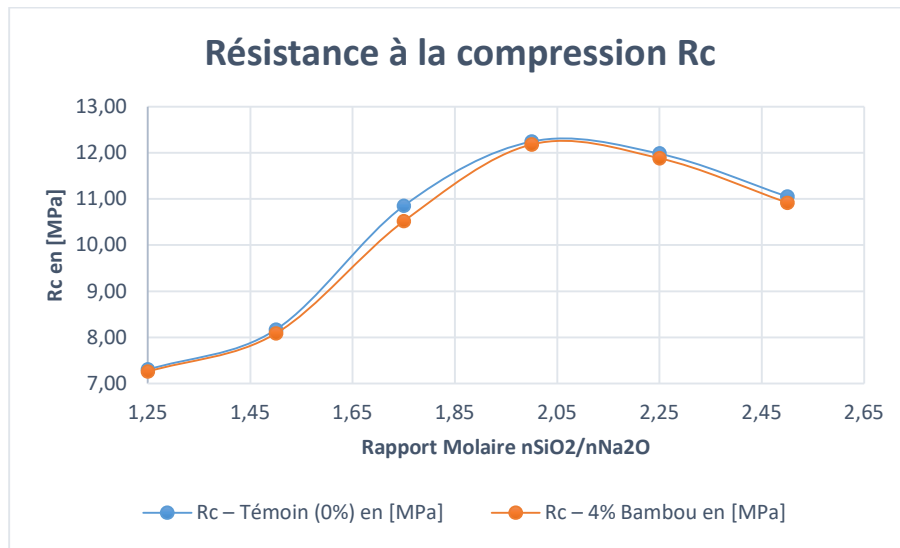


Figure 27: Evolution de la résistance à la compression ( $R_c$ ) des éprouvettes en fonction du rapport molaire du silicate de soude  $n\text{SiO}_2/n\text{Na}_2\text{O}$

Les résultats présentés dans le Tableau 2 montrent que la résistance à la compression du béton géopolymère, aussi bien pour la formulation témoin que pour celle renforcée par 4 % de fibres de bambou, est fortement influencée par le rapport molaire du silicate de soude  $n(\text{SiO}_2)/n(\text{Na}_2\text{O})$  [7][8].

Pour le béton témoin, la résistance à la compression augmente progressivement de 7,30 MPa pour un rapport de 1,25 à 12,25 MPa pour un rapport de 2,00, soit une augmentation d'environ 68 %. Une tendance similaire est observée pour le béton fibré, où la résistance passe de 7,25 MPa à 12,18 MPa sur le même intervalle [9][10].

Cette amélioration progressive s'explique par une augmentation de la quantité de silice soluble dans la solution activatrice, favorisant la dissolution des phases amorphes du métakaolin et de la cendre de balle de riz, puis la formation d'un réseau géopolymérique plus dense et plus continu [7][11]. Le rapport molaire du silicate de soude  $n(\text{SiO}_2)/n(\text{Na}_2\text{O})=2$  apparaît ainsi comme une valeur optimale, correspondant à un équilibre favorable entre alcalinité et disponibilité en espèces silicatées [8][10].

Au-delà de cette valeur, une diminution de la résistance est observée. À  $n(\text{SiO}_2)/n(\text{Na}_2\text{O})=2,5$  la résistance chute à 11,05 MPa pour le béton témoin et 10,92 MPa pour le béton fibré. Cette baisse peut être attribuée à un excès de silice dans le milieu réactionnel, entraînant une augmentation de la viscosité de l'activateur alcalin, une réduction de la mobilité ionique et une polycondensation moins efficace, conduisant à une microstructure moins compacte [9][11].

#### 4.1.2 Influence sur la résistance à la traction par flexion :

Tableau 3: Résistance à la traction par flexion ( $R_f$ ) en fonction du rapport molaire du silicate de soude  $n\text{SiO}_2/n\text{Na}_2\text{O}$

| Rapport $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ | $R_f$ – Témoin (0%) en [MPa] | $R_f$ – 4% Bambou en [MPa] |
|--------------------------------------------|------------------------------|----------------------------|
| 1,25                                       | 1,95                         | 2,10                       |
| 1,50                                       | 2,25                         | 2,55                       |
| 1,75                                       | 2,55                         | 3,15                       |
| 2,00                                       | 2,80                         | 3,60                       |

|      |      |      |
|------|------|------|
| 2,25 | 2,70 | 3,30 |
| 2,50 | 2,45 | 2,90 |

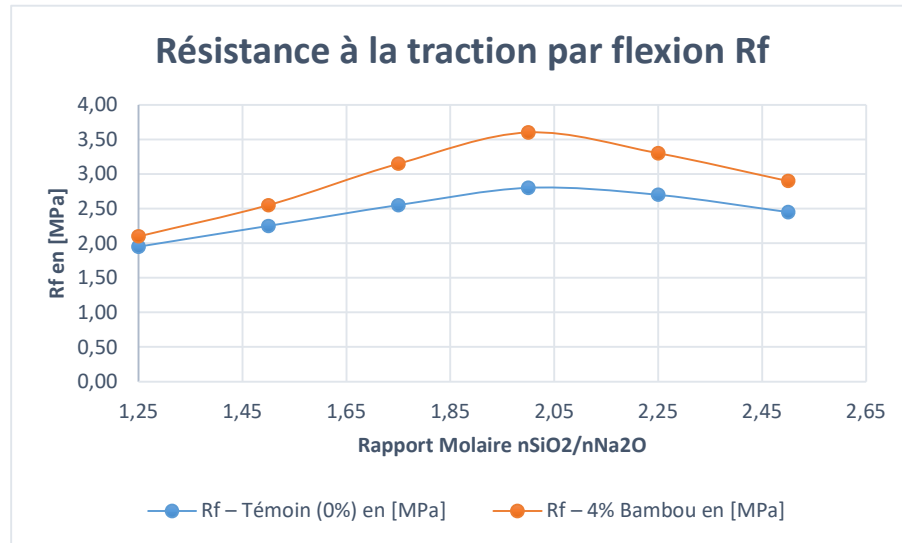


Figure 28: Evolution de la résistance de la résistance à la traction par flexion ( $R_f$ ) en fonction du rapport molaire du silicate de soude  $n\text{SiO}_2/n\text{Na}_2\text{O}$

L'évolution de la résistance à la traction par flexion, présentée dans le Tableau 3, suit la même tendance générale que celle observée pour la compression.

Pour le béton témoin, la résistance en flexion augmente de 1,95 MPa à 2,80 MPa lorsque le rapport molaire du silicate de soude  $n(\text{SiO}_2)/n(\text{Na}_2\text{O})$  passe de 1,25 à 2,00. Pour le béton fibré, cette augmentation est encore plus marquée, passant de 2,10 MPa à 3,60 MPa, soit un gain d'environ 71% [8][10].

La contribution des fibres de bambou est particulièrement visible en traction par flexion, où elles jouent un rôle de pontage des fissures, améliorant la capacité du matériau à absorber et redistribuer les contraintes. L'effet combiné d'une matrice géopolymère dense et d'un renforcement fibreux efficace explique les performances supérieures observées pour le béton fibré.

Comme pour la compression, une diminution de la résistance est observée au-delà du rapport optimal. À  $n(\text{SiO}_2)/n(\text{Na}_2\text{O})=2,5$ , la résistance en flexion du béton fibré chute à 2,90 MPa, traduisant une dégradation progressive de la cohésion matricielle et de l'interface matrice-fibres [12][16].

#### 4.1.3 Corrélation entre propriétés mécaniques et propriétés physiques :

Tableau 4: Propriétés physiques du rapport molaire silice/soude – Sans fibres

| SF Témoin                                |                                           |                       |                  |                        |                         |
|------------------------------------------|-------------------------------------------|-----------------------|------------------|------------------------|-------------------------|
| $n(\text{SiO}_2)/n(\text{Na}_2\text{O})$ | $\rho_d$ ( $\text{t}\cdot\text{m}^{-3}$ ) | Teneur en eau $w$ (%) | Porosité $n$ (%) | Indice de vide $e$ (%) | Retrait linéaire (mm/m) |
| 1,25                                     | 2,090                                     | 5,80                  | 14,80            | 17,37                  | 0,25                    |
| 1,50                                     | 2,115                                     | 5,50                  | 13,20            | 15,21                  | 0,22                    |

|      |       |      |       |       |      |
|------|-------|------|-------|-------|------|
| 1,75 | 2,145 | 5,10 | 12,00 | 13,64 | 0,20 |
| 2,00 | 2,175 | 4,80 | 10,60 | 11,86 | 0,18 |
| 2,25 | 2,160 | 4,90 | 11,20 | 12,61 | 0,19 |
| 2,50 | 2,130 | 5,20 | 12,50 | 14,29 | 0,21 |

Tableau 5: Propriétés physiques du rapport molaire silice/soude – Fibres de bambou 4%

| 4% Bambou                                |                                               |                     |                |                      |                         |
|------------------------------------------|-----------------------------------------------|---------------------|----------------|----------------------|-------------------------|
| $n(\text{SiO}_2)/n(\text{Na}_2\text{O})$ | $\rho_d \text{ (t}\cdot\text{m}^{-3}\text{)}$ | Teneur en eau w (%) | Porosité n (%) | Indice de vide e (%) | Retrait linéaire (mm/m) |
| 1,25                                     | 2,035                                         | 6,40                | 16,80          | 20,19                | 0,30                    |
| 1,50                                     | 2,060                                         | 6,00                | 15,50          | 18,34                | 0,27                    |
| 1,75                                     | 2,090                                         | 5,60                | 14,00          | 16,28                | 0,24                    |
| 2,00                                     | 2,115                                         | 5,30                | 12,80          | 14,68                | 0,21                    |
| 2,25                                     | 2,100                                         | 5,40                | 13,50          | 15,61                | 0,22                    |
| 2,50                                     | 2,070                                         | 5,80                | 15,00          | 17,65                | 0,25                    |

Les données des Tableaux 4 et 5 mettent en évidence une corrélation directe entre les performances mécaniques et les propriétés physiques des bétons étudiés.

Pour les formulations sans fibres, l'augmentation du rapport du silicate de soude  $n(\text{SiO}_2)/n(\text{Na}_2\text{O})$  de 1,25 à 2,00 entraîne :

- Une augmentation de la masse volumique sèche de 2,090 à 2,175  $\text{t}\cdot\text{m}^{-3}$  ;
- Une diminution de la porosité de 14,80% à 10,60% ;
- Une réduction du retrait linéaire de 0,25 à 0,18 mm/m.

Ces évolutions traduisent une densification progressive de la matrice géopolymère, expliquant l'augmentation simultanée des résistances mécaniques [10][11].

Pour les bétons fibrés, bien que les valeurs de porosité soient plus élevées (jusqu'à 16,80% pour  $n(\text{SiO}_2)/n(\text{Na}_2\text{O})=1,25$ ), une tendance similaire est observée avec une diminution de la porosité à 12,80% pour le rapport optimal de 2,00. Cette porosité plus élevée est attribuée à la nature hydrophile des fibres de bambou et à leur capacité d'absorption d'eau, mais elle n'empêche pas l'amélioration des propriétés mécaniques, en particulier en flexion [6][9].

Au-delà de  $n(\text{SiO}_2)/n(\text{Na}_2\text{O})=2,00$ , l'augmentation de la porosité et de la teneur en eau est accompagnée d'une baisse des résistances, confirmant le lien étroit entre compacité microstructurale et performances mécaniques [14][15].

#### 4.1.4 Analyse globale et implication sur la formulation :

L'analyse conjointe des propriétés mécaniques et physiques permet d'identifier un rapport molaire optimal  $n(\text{SiO}_2)/n(\text{Na}_2\text{O}) \approx 2,00$  pour le béton géopolymère fibré étudié. À cette valeur, les résistances à la compression ( $\approx 12$  MPa) et à la traction par flexion ( $\approx 3,6$  MPa pour le béton fibré) sont maximales, tandis que la porosité et le retrait linéaire atteignent des niveaux minimaux [7][8][9][10].

Ce rapport correspond à un équilibre optimal entre alcalinité et teneur en silice soluble, favorisant une dissolution efficace des précurseurs aluminosilicatés et une polycondensation complète de la matrice géopolymère. La présence de chaux contribue à la formation de gels mixtes N-A-S-H / C-(A)-S-H, améliorant la cohésion et la densification de la matrice [9][12].

Ainsi, le choix d'un rapport molaire du silicate de soude  $n(\text{SiO}_2)/n(\text{Na}_2\text{O})$  voisin de 2,00 apparaît comme un paramètre clé pour l'optimisation de la formulation de bétons géopolymères fibrés à base de métakaolin et de cendre de balle de riz, destinés à des applications structurelles et éco-compatibles [10][11][16].

#### 4.6 Influence sur le mode de conservation des éprouvettes :

Nous avons étudié trois âges pour les éprouvettes : 02 jours, 07 jours et 28 jours.

- Le rapport molaire silice/soude  $\frac{n\text{Si}_2}{n\text{Na}_2\text{O}} = 2$  ;
- Le rapport molaire chaux/métakaolin  $\frac{n\text{CaO}}{n\text{MK}} = 7,11$  ;
- Le rapport molaire silice/alumine  $\frac{n\text{SiO}_2}{n\text{Al}_2\text{O}_3} = 4,04$  ;
- Le rapport molaire silicate de soude/métakaolin  $\frac{n\text{SS}}{n\text{MK}} = 0,71$  ;
- Les pourcentages des fibres à incorporer sont respectivement : 0% (témoin), 4% de fibre de bambou ;
- Le mode de conservation des échantillons : dans l'eau et à l'air libre.

Les résultats obtenus sont regroupés dans les tableaux suivants :

##### 4.6.1 Influence du mode de conservation sur les propriétés mécaniques et physiques du béton géopolymère :

Les résultats expérimentaux montrent que le mode de conservation influence significativement l'évolution des propriétés mécaniques et physiques du béton géopolymère fibré. Globalement, les éprouvettes conservées dans l'eau présentent des performances supérieures à celles conservées à l'air libre, en particulier aux jeunes âges. Cette tendance est attribuée à la disponibilité continue en eau, essentielle à la dissolution des espèces aluminosilicatées et à la poursuite des réactions de géopolymérisation [17][18].

À titre d'exemple, dès 2 jours, la résistance à la compression du béton témoin passe de 5,15 MPa à l'air à 6,15 MPa dans l'eau, soit une augmentation d'environ 19 %, confirmant l'effet bénéfique d'une cure humide dès les premières phases de durcissement [18][19].

##### 4.6.2 Influence du mode de conservation sur la résistance à la compression (Rc) :

Tableau 6: Comparaison de la résistance à la compression (Rc) en fonction de l'âge des éprouvettes et du mode de conservation

| Age des éprouvettes (jours) | Rc – Témoin (0%) en [MPa]-AIR | Rc – Témoin (0%) en [MPa]-EAU | Rc – 4% Bambou en [MPa]-AIR | Rc – 4% Bambou en [MPa]-EAU |
|-----------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| 2,00                        | 5,15                          | 6,15                          | 4,95                        | 6,45                        |
| 7,00                        | 14,73                         | 15,06                         | 14,98                       | 15,08                       |
| 28,00                       | 24,55                         | 25,82                         | 24,64                       | 25,92                       |

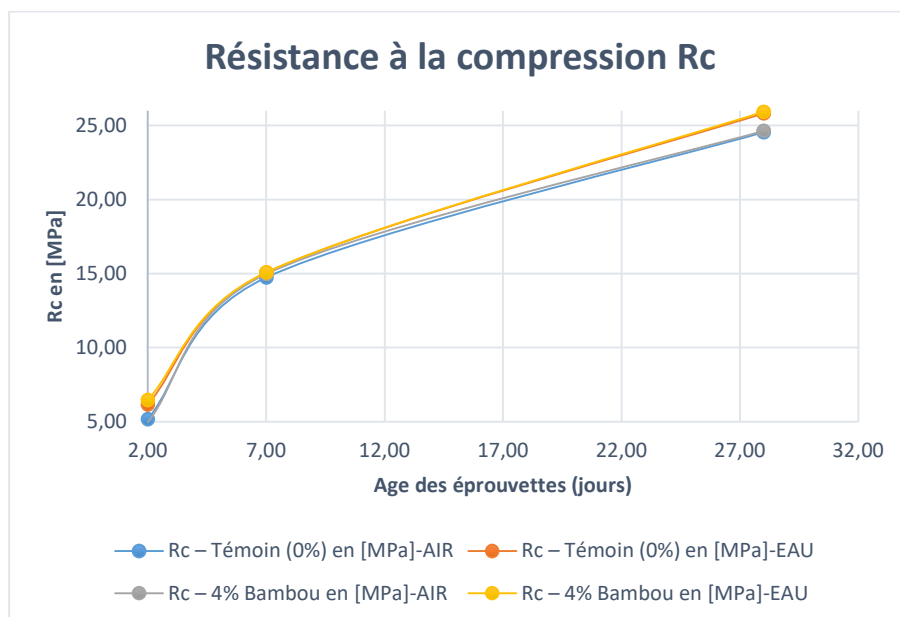


Figure 29: Evolution de la résistance de la résistance à la compression ( $R_c$ ) en fonction de l'âge et du mode de conservation des éprouvettes

La résistance à la compression augmente avec l'âge pour les deux modes de conservation, traduisant la maturation progressive de la matrice géopolymère. Cependant, pour chaque âge étudié, les éprouvettes conservées dans l'eau présentent systématiquement des valeurs de  $R_c$  légèrement supérieures [18][20].

Pour les formulations sans fibres,  $R_c$  atteint 25,82 MPa à 28 jours en conservation humide contre 24,55 MPa à l'air libre, soit un gain d'environ 5 %. Pour les bétons fibrés à 4 % de bambou, la même tendance est observée avec des valeurs respectives de 25,92 MPa et 24,64 MPa. Ces résultats suggèrent que la cure humide favorise la densification de la matrice et limite les défauts microstructuraux liés à la dessiccation [19][20].

Il est également notable qu'à 7 jours, l'écart entre les deux modes de conservation reste faible (environ 2 %), indiquant que la majorité du gain en compression est acquise à moyen et long terme grâce à la poursuite des réactions de géopolymérisation [18].

#### 4.6.3 Influence du mode de conservation sur la résistance à la traction par flexion ( $R_f$ ) :

Tableau 7: Comparaison de la résistance à la traction par flexion ( $R_f$ ) en fonction de l'âge des éprouvettes et le mode de conservation

| Age des éprouvettes (jours) | $R_f$ – Témoin (0%) en [MPa]-AIR | $R_f$ – Témoin (0%) en [MPa]-EAU | $R_f$ – 4% Bambou en [MPa]-AIR | $R_f$ – 4% Bambou en [MPa]-EAU |
|-----------------------------|----------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| 2,00                        | 0,77                             | 0,85                             | 1,28                           | 1,40                           |
| 7,00                        | 3,12                             | 3,25                             | 3,36                           | 4,00                           |
| 28,00                       | 3,86                             | 4,55                             | 4,40                           | 5,30                           |

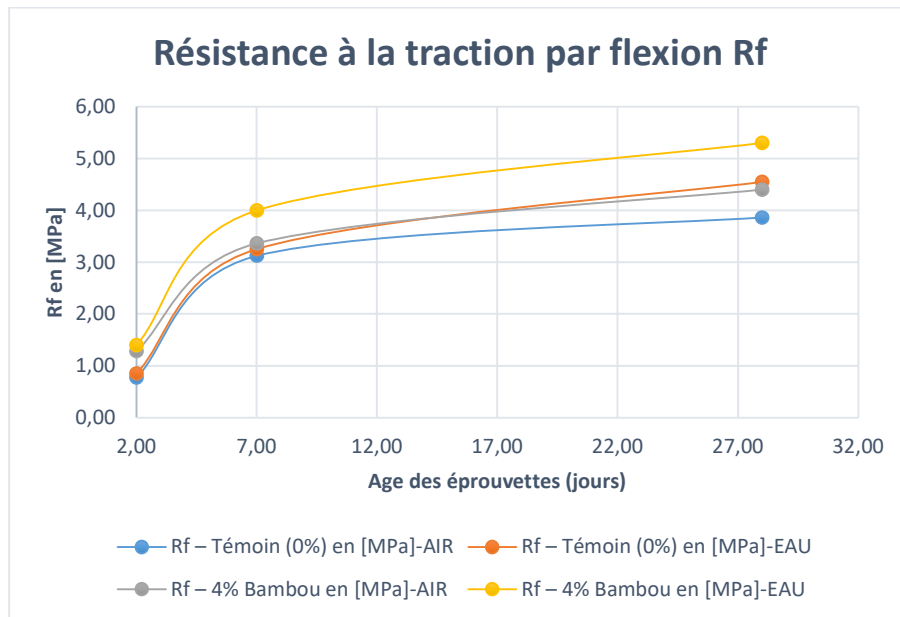


Figure 30: Evolution de la résistance de la résistance à la traction par flexion ( $R_f$ ) en fonction de l'âge et du mode conservation des éprouvettes

La résistance à la traction par flexion est fortement influencée à la fois par le mode de conservation et par la présence de fibres de bambou. Globalement, les éprouvettes conservées dans l'eau présentent des valeurs de  $R_f$  supérieures à celles conservées à l'air libre, quelle que soit la formulation étudiée. Toutefois, l'écart de performance est nettement plus marqué pour les bétons fibrés que pour les bétons sans fibres [21][22].

Pour les éprouvettes sans fibres, la conservation dans l'eau permet une amélioration modérée de la résistance à la flexion. À 28 jours, la  $R_f$  passe de 3,86 MPa à l'air libre à 4,55 MPa dans l'eau, soit un gain d'environ 18 %. Cette amélioration est principalement liée à une meilleure continuité de la matrice géopolymère et à une réduction des microfissures induites par le retrait [20].

En revanche, pour les bétons renforcés par 4 % de fibres de bambou, l'effet combiné de la conservation humide et du renforcement fibreux devient beaucoup plus significatif. À 28 jours, la  $R_f$  atteint 5,30 MPa pour les éprouvettes conservées dans l'eau, contre 4,40 MPa à l'air libre, correspondant à une augmentation de plus de 20 %. Dès les jeunes âges, cet effet est déjà perceptible : à 7 jours, la  $R_f$  du béton fibré est de 4,00 MPa dans l'eau contre 3,36 MPa à l'air, alors que le béton témoin ne passe que de 3,12 MPa à 3,25 MPa [21][22].

Ces résultats montrent clairement que les fibres de bambou amplifient l'effet bénéfique de la conservation humide sur la résistance à la traction par flexion. La cure dans l'eau favorise une meilleure adhérence fibre-matrice, limitant le glissement des fibres et améliorant le mécanisme de pontage des fissures. À l'inverse, la conservation à l'air libre induit un retrait plus important, susceptible de fragiliser l'interface fibre-matrice et de réduire l'efficacité du renforcement [22].

Ainsi, la présence de fibres de bambou transforme la sensibilité du béton géopolymère au mode de conservation, rendant la cure humide particulièrement déterminante pour l'optimisation des performances en traction par flexion.

#### 4.6.4 Corrélation avec les propriétés physiques :

Tableau 8: Propriétés physiques en fonction de l'âge des éprouvettes – Sans fibres – AIR

| SF Témoin-AIR               |                               |                     |                |                      |                         |
|-----------------------------|-------------------------------|---------------------|----------------|----------------------|-------------------------|
| Age des éprouvettes (jours) | $\rho_d$ (t·m <sup>-3</sup> ) | Teneur en eau w (%) | Porosité n (%) | Indice de vide e (%) | Retrait linéaire (mm/m) |
| 2,00                        | 2,195                         | 4,65                | 9,85           | 10,93                | 0,18                    |
| 7,00                        | 2,220                         | 4,45                | 9,15           | 10,07                | 0,17                    |
| 28,00                       | 2,295                         | 4,02                | 7,95           | 8,64                 | 0,14                    |

Tableau 9: Propriétés physiques en fonction de l'âge des éprouvettes – Sans fibres – EAU

| SF Témoin – EAU             |                               |                     |                |                      |                         |
|-----------------------------|-------------------------------|---------------------|----------------|----------------------|-------------------------|
| Age des éprouvettes (jours) | $\rho_d$ (t·m <sup>-3</sup> ) | Teneur en eau w (%) | Porosité n (%) | Indice de vide e (%) | Retrait linéaire (mm/m) |
| 2,00                        | 2,190                         | 4,60                | 9,80           | 10,86                | 0,17                    |
| 7,00                        | 2,225                         | 4,40                | 9,10           | 10,01                | 0,16                    |
| 28,00                       | 2,290                         | 4,00                | 7,90           | 8,58                 | 0,13                    |

Tableau 10: Propriétés physiques en fonction de l'âge des éprouvettes – Fibres de bambou 4% – AIR

| 4% Bambou-AIR               |                               |                     |                |                      |                         |
|-----------------------------|-------------------------------|---------------------|----------------|----------------------|-------------------------|
| Age des éprouvettes (jours) | $\rho_d$ (t·m <sup>-3</sup> ) | Teneur en eau w (%) | Porosité n (%) | Indice de vide e (%) | Retrait linéaire (mm/m) |
| 2,00                        | 2,140                         | 3,90                | 12,80          | 14,68                | 0,26                    |
| 7,00                        | 2,190                         | 3,40                | 11,50          | 12,99                | 0,32                    |
| 28,00                       | 2,235                         | 3,00                | 10,20          | 11,36                | 0,38                    |

Tableau 11: Propriétés physiques en fonction de l'âge des éprouvettes – Fibres de bambou 4% – EAU

| 4% Bambou – EAU             |                               |                     |                |                      |                         |
|-----------------------------|-------------------------------|---------------------|----------------|----------------------|-------------------------|
| Age des éprouvettes (jours) | $\rho_d$ (t·m <sup>-3</sup> ) | Teneur en eau w (%) | Porosité n (%) | Indice de vide e (%) | Retrait linéaire (mm/m) |
| 2,00                        | 2,185                         | 5,20                | 11,30          | 12,74                | 0,17                    |
| 7,00                        | 2,240                         | 4,60                | 9,90           | 10,99                | 0,19                    |
| 28,00                       | 2,290                         | 4,10                | 8,70           | 9,53                 | 0,22                    |

Les propriétés physiques mesurées permettent d'expliquer les différences mécaniques observées. Les éprouvettes conservées dans l'eau présentent des masses volumiques sèches légèrement plus élevées et des porosités plus faibles. Par exemple, pour le béton témoin à 28 jours, la porosité est de 7,90 % en conservation humide contre 7,95 % à l'air libre, tandis que le retrait linéaire est réduit de 0,14 mm/m à 0,13 mm/m [20].

Dans le cas des bétons fibrés, l'effet du mode de conservation est plus marqué sur le retrait. À 28 jours, le retrait atteint 0,38 mm/m pour les éprouvettes conservées à l'air libre, contre 0,22 mm/m pour celles conservées dans l'eau. Cette augmentation du retrait à l'air libre favorise l'apparition de microfissures, ce qui explique la diminution relative des résistances mécaniques, notamment en flexion [21][23].

#### 4.6.5 Analyse globale :

L'analyse globale montre que la conservation dans l'eau permet d'optimiser simultanément les propriétés mécaniques et physiques du béton géopolymère fibré. Les gains observés en compression restent modérés (de l'ordre de 5 à 10 % à 28 jours), tandis que les améliorations en traction par flexion sont plus significatives, pouvant dépasser 20 %, en particulier pour les formulations fibrées [18][21].

Ces résultats soulignent que, dans le cas des bétons géopolymères à base de métakaolin partiellement enrichis en chaux et renforcés par des fibres naturelles, une cure humide constitue une condition essentielle pour garantir une microstructure dense, limiter le retrait et maximiser l'efficacité du renforcement fibreux. Le mode de conservation doit ainsi être considéré comme un paramètre clé dans la formulation et la mise en œuvre de ce type de matériau [20][23].

#### CONCLUSION :

Les résultats expérimentaux obtenus dans cette étude démontrent clairement que le rapport molaire du silicate de soude  $n(\text{SiO}_2)/n(\text{Na}_2\text{O})$  et le mode de conservation exercent une influence déterminante sur les performances du béton géopolymère fibré à base de métakaolin, cendre de balle de riz et chaux. Une augmentation progressive du rapport silice/soude de 1,25 à 2,00 permet d'améliorer significativement les propriétés mécaniques, avec une augmentation de la résistance à la compression d'environ 68% (de 7,30 MPa à 12,25 MPa) et de la résistance à la traction par flexion de près de 44% pour le béton témoin et 71 % pour le béton fibré à 4 % de bambou.

Cette amélioration est associée à une densification de la matrice géopolymère, caractérisée par une augmentation de la masse volumique sèche jusqu'à  $2,175 \text{ t}\cdot\text{m}^{-3}$ , une réduction de la porosité de 14,8 % à 10,6 %, et une diminution du retrait linéaire de 0,25 mm/m à 0,18 mm/m. Toutefois, pour des rapports supérieurs à 2,00, une légère dégradation des performances mécaniques est observée, traduisant un excès de silice limitant l'efficacité des réactions de géopolymérisation.

En outre, la conservation des éprouvettes dans l'eau favorise le développement des gels liants et permet d'obtenir des résistances mécaniques supérieures à celles des éprouvettes conservées à l'air libre, quels que soient l'âge et la formulation. L'ensemble de ces résultats confirme que l'optimisation conjointe de la formulation chimique et des conditions de cure est essentielle pour le développement de bétons géopolymères fibrés performants et durables.

Ces travaux mettent en évidence le fort potentiel du système géopolymère à base de métakaolin et de cendre de balle de riz et de la chaux éteinte comme alternative éco-efficace aux matériaux cimentaires conventionnels, tout en valorisant des ressources locales et des sous-produits agro-industriels.

#### REFERENCES :

- [01] Scrivener, K. L., John, V. M., & Gartner, E. M. (2018). « Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO<sub>2</sub> cement-based materials industry ». *Cement and Concrete Research*, 114, 2–26.
- [02] Davidovits, J. (2011). « Geopolymer chemistry and applications ». Institut Géopolymère, France.
- [03] Provis, J. L., & van Deventer, J. S. J. (2014). *Alkali Activated Materials: State-of-the-Art Report* ». RILEM TC 224-AAM.

- [04] Duxson, P., et al. (2007). « Geopolymer technology: the current state of the art ». *Journal of Materials Science*, 42, 2917–2933.
- [05] Bernal, S. A., et al. (2016). « Mechanical and durability performance of fibre-reinforced alkali-activated materials ». *Cement and Concrete Composites*, 65, 292–305.
- [06] Habert, G., et al. (2020). « Environmental impacts and decarbonization strategies in the cement and concrete industries ». *Nature Reviews Earth & Environment*, 1, 559–573.
- [07] Davidovits, J. (1991). « Geopolymers : Inorganic polymeric new materials ». *Journal of Thermal Analysis*, Vol. 37, pp. 1633–1656.
- [08] Davidovits, J. (2011). « Geopolymer chemistry and applications (3rd edition) ». Institut Géopolymère, Saint-Quentin, France.
- [09] Palomo, A., Grutzeck, M. W., & Blanco, M. T. (1999). « Alkali-activated fly ashes: A cement for the future ». *Cement and Concrete Research*, Vol. 29, pp. 1323–1329.
- [10] Duxson, P., Fernández-Jiménez, A., Provis, J. L., Lukey, G. C., Palomo, A., & van Deventer, J. S. J. (2007). « Geopolymer technology: The current state of the art ». *Journal of Materials Science*, Vol. 42, pp. 2917–2933.
- [11] Duxson, P., Lukey, G. C., & van Deventer, J. S. J. (2005). « The effect of alkali cations on the properties of geopolymeric binders ». *Journal of Non-Crystalline Solids*, Vol. 351, pp. 2180–2187.
- [12] Provis, J. L., & van Deventer, J. S. J. (2009). « Geopolymers: Structure, processing, properties and industrial applications ». Woodhead Publishing, Cambridge, United Kingdom.
- [13] Yip, C. K., Lukey, G. C., & van Deventer, J. S. J. (2005). « The coexistence of geopolymeric gel and calcium silicate hydrate at the early stage of alkaline activation ». *Cement and Concrete Research*, Vol. 35, pp. 1688–1697.
- [14] Garcia-Lodeiro, I., Palomo, A., Fernández-Jiménez, A., & Macphee, D. E. (2011). « Compatibility studies between N-A-S-H and C-A-S-H gels ». *Cement and Concrete Research*, Vol. 41, pp. 923–931.
- [15] Korniejenko, K., Łach, M., Dogan-Saglamtimur, N., & Furtos, G. (2016). « Mechanical properties of geopolymer composites reinforced with natural fibers ». *Procedia Engineering*, Vol. 151, pp. 388–393.
- [16] Bernal, S. A., & Provis, J. L. (2014). « Durability of alkali-activated materials: Progress and perspectives ». *Journal of the American Ceramic Society*, Vol. 97, pp. 997–1008.
- [17] Provis, J. L., & van Deventer, J. S. J. (2009). « Geopolymers: Structure, processing, properties and industrial applications ». Woodhead Publishing, Cambridge, United Kingdom. Source : Ouvrage de référence international sur la géopolymérisation, cure et durcissement.
- [18] Duxson, P., Fernández-Jiménez, A., Provis, J. L., Lukey, G. C., Palomo, A., & van Deventer, J. S. J. (2007). « Geopolymer technology: The current state of the art ». *Journal of Materials Science*, Vol. 42, pp. 2917–2933. Source : Revue scientifique internationale – effet de la cure, âge, microstructure.
- [19] Palomo, A., Grutzeck, M. W., & Blanco, M. T. (1999). « Alkali-activated fly ashes: A cement for the future ». *Cement and Concrete Research*, Vol. 29, pp. 1323–1329. Source : Journal Elsevier – rôle de la cure humide et évolution des résistances mécaniques.
- [20] Bernal, S. A., & Provis, J. L. (2014). « Durability of alkali-activated materials: Progress and perspectives ». *Journal of the American Ceramic Society*, Vol. 97, pp. 997–1008. Source : Journal Wiley – porosité, retrait, durabilité et influence du mode de conservation.

- [21] Korniejenko, K., Łach, M., & Mikula, J. (2016). « The influence of curing conditions on the properties of geopolymer composites reinforced with natural fibers ». *Procedia Engineering*, Vol. 151, pp. 388–393. Source : Elsevier – interaction cure humide / fibres naturelles / traction.
- [22] Li, Z., Wang, L., & Wang, X. (2006). « Properties of hemp fiber reinforced concrete composites ». *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 37, pp. 497–505. Source : Elsevier – adhérence fibre–matrice, pontage des fissures, effet du retrait.
- [23] Garcia-Lodeiro, I., Palomo, A., Fernández-Jiménez, A., & Macphee, D. E. (2011). « Compatibility studies between N-A-S-H and C-A-S-H gels ». *Cement and Concrete Research*, Vol. 41, pp. 923–931. Source : Elsevier – densification de la matrice, rôle du calcium et cure.
- [24] KOERA Rasoloniaina Antoine, « Formulation des bétons drainants à partir de liant cimentaire et géopolymère », Thèse de Doctorat, Equipe d'accueil Doctorale en Ingénierie des Matériaux et des Matières Premières, Université d'Antananarivo, 2021
- [25] RATSIMBAZAFY Hery Mikaela, « 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, Département Science des Matériaux et Métallurgie, Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo, Université d'Antananarivo, Antananarivo, Madagascar. Inédit. 190p, 2012.
- [26] N. H. RAKOTOSON, « Elaboration et caractérisation de brique réfractaire à base de liant géopolymère et de bauxite calcinée », 2015.
- [27] S. A. RADOELIZO, « Contribution à l'étude des bétons hautes performances-utilisation du métakaolin comme fines d'ajout », 2008.
- [28] RAKOTOARIMANANA Mike Jean Yves, RASOLOFONIRINA Andry Franck, « Essai de fabrication d'un ciment par le procédé de géopolymérisation », DEA, Département Science des Matériaux et Métallurgie, Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo, Université d'Antananarivo, 2007.
- [29] RANDRIANTSEHENO José, « 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 fin d'études, Mention Science et Ingénierie des Matériaux, Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo, Université d'Antananarivo, 2019.