

Évaluation De La Durabilité Chimique De Bétons Géopolymères Synthétisés A Base De Ressources Locales: Cendre De Balle De Riz Et De Métakaolin

[Evaluation Of The Chemical Durability Of Geopolymer Concretes Synthesized From Local Resources: Rice Husk Ash And Metakaolin]

RAZAFY Nomenjanahary Rivo¹, KOERA Rasoloniaina Antoine², RATSIMBAZAFY Hery Mikaela³,
RAKOTOMALALA Zolimboahangy⁴, RANDRIANA Nambinina Richard Fortuné⁵

Université d'Antananarivo, Ecole Doctorale en Génie des Procédés des Systèmes Industriels, Agricoles et
Alimentaires (GPSIAA), Madagascar

Auteur correspondant : RAZAFY Nomenjanahary Rivo. E-mail : rivorazafy951@gmail.com



Résumé — Cette étude examine la durabilité chimique de bétons géopolymères élaborés à partir de ressources disponibles à Madagascar, notamment la cendre de balle de riz (CBR), le métakaolin (MK) et la chaux. La CBR est valorisée à la fois comme source de silice dans le liant et comme matière première pour la préparation du silicate de sodium alcalin. Après une optimisation séquentielle du rapport molaire et des compositions, la formulation F5, constituée de 10 % de CBR, 8 % de MK et 8 % de chaux, a été retenue pour les essais d'agression acide. Des éprouvettes prismatiques ont été exposées à des solutions d'acide chlorhydrique et sulfurique à 5 % et 10 %, pendant 7 et 14 jours, et comparées à des bétons ordinaires. Les principaux indicateurs sont la perte de masse, le retrait volumique et la résistance à la compression. À 14 jours, les pertes massiques des bétons géopolymères sont de 5,14 à 10,46 %, contre 14,40 à 48,04 % pour les témoins ordinaires. Les résistances à la compression atteignent 18,43 à 20,56 MPa pour les géopolymères, contre 6,92 à 12,81 MPa pour les témoins. Après 14 jours, les retraits volumiques varient de 12,51 à 24,53 % pour les bétons géopolymères et de 16,63 à 49,01 % pour les témoins ordinaires. Les milieux les plus concentrés accroissent globalement les dégradations, particulièrement sous acide sulfurique. Ces observations mettent en évidence un comportement comparativement favorable des liants étudiés à court terme.

Mots-clés : activation alcaline ; attaque acide ; stabilité dimensionnelle ; résistance à la compression ; valorisation agricole ; silicate de sodium ; Madagascar.

Abstract — This study investigates the chemical durability of geopolymer concrete produced from locally available resources in Madagascar, namely rice husk ash, metakaolin, and lime. Rice husk ash was used both as a silica-rich component of the binder and as a feedstock for laboratory-prepared sodium silicate. A sequential experimental approach was adopted to assess the activator silica-to-sodium oxide molar ratio, precursor proportions, and mixing water-to-sodium silicate balance. The selected formulation contained 10% rice husk ash, 8% metakaolin, and 8% lime, as reported in the experimental mix design. Prismatic specimens were exposed to hydrochloric and sulfuric acid solutions at concentrations of 5% and 10% for 7 and 14 days, and their behavior was compared with that of conventional concrete specimens under matching exposure conditions. Mass loss, volumetric change, and compressive strength were examined. After 14 days, geopolymer concretes exhibited mass losses between 5.14% and 10.46%, compared with 14.40% to 48.04% for the corresponding conventional concretes. Compressive strengths after exposure ranged from 18.43 to 20.56 MPa for geopolymer concretes and from 6.92 to 12.81 MPa for conventional concretes. After 14 days, volumetric reductions ranged from 12.51% to 24.53% for geopolymer concrete and from 16.63% to 49.01% for conventional concrete. Increasing acid concentration and

exposure duration generally intensified deterioration, particularly in sulfuric acid solutions. These results highlight the promising short-term acid resistance of the investigated binder system.

Keywords: alkaline activation; acid attack; dimensional stability; compressive strength; agricultural valorization; sodium silicate; Madagascar.

1. INTRODUCTION

La durabilité des bétons au contact d'effluents acides constitue un enjeu majeur pour les ouvrages industriels, hydrauliques et d'assainissement. Les matériaux cimentaires ordinaires peuvent subir une dissolution de leurs phases hydratées, une décalcification et une désorganisation de la matrice, qui affectent simultanément leur intégrité dimensionnelle et leurs propriétés mécaniques. Les matériaux activés alcalinement offrent une voie complémentaire de développement de liants utilisant des aluminosilicates naturels ou résiduels ; leur intérêt dépend néanmoins d'une formulation maîtrisée et de l'évaluation effective de leur comportement dans les environnements d'usage [1], [2].

La synthèse des matériaux géopolymères repose sur la dissolution alcaline de précurseurs réactifs, puis sur la réorganisation et la polycondensation d'espèces silicatées et aluminates. La nature des phases consolidées dépend du rapport Si/Al, de la composition de l'activateur et de la teneur en calcium. Dans les systèmes contenant de la chaux, la coexistence possible de gels aluminosilicatés sodiques et de phases calciques complique l'interprétation des performances face aux acides : un apport de calcium peut participer au durcissement initial tout en générant des phases dont la stabilité chimique doit être examinée [3].

Les cendres de balle de riz (CBR) présentent un intérêt particulier dans les territoires rizicoles, car elles constituent une source siliceuse susceptible d'être incorporée dans le liant. La transformation de la silice des cendres en silicate de sodium permet également d'envisager un activateur préparé à partir de matières premières disponibles localement. La faisabilité de cette approche a été documentée pour des géopolymères à base de métakaolin [4]. À Madagascar, des travaux sur les mortiers à base de kaolin et de cendres de balle de riz ont déjà mis en évidence l'intérêt de cette association face aux milieux acides [5]. Il demeure pertinent d'en examiner l'extension à des bétons contenant des granulats et de la chaux.

Dans le domaine des bétons géopolymères, les études en acide sulfurique ont établi que les paramètres de formulation et la constitution microstructurale influencent fortement les cinétiques d'altération [6]. Par ailleurs, la combinaison CBR-métakaolin a été étudiée dans des bétons autocompactants à liant Portland partiellement substitué [7] ; ce système ne doit toutefois pas être confondu avec un béton élaboré par activation alcaline. L'originalité du présent travail réside dans la comparaison directe de bétons à liant géopolymère utilisant des ressources locales et de bétons ordinaires, sous deux acides, deux concentrations et deux temps d'exposition, en mobilisant plusieurs indicateurs complémentaires.

L'objectif est d'évaluer l'influence de la nature du milieu acide, de sa concentration et de la durée d'immersion sur la perte de masse, la variation volumique et la résistance à la compression de bétons géopolymères issus de la formulation retenue.

2. MATÉRIELS ET MÉTHODES

2.1 . Matières premières et origine des constituants

Les balles de riz proviennent d'unités de décorticage de la région d'Antsirabe (Madagascar). Le kaolin provient du gisement d'Analabe-Ibity et a été fourni par PROCHIMAD. Une fleur de chaux BOUTSIKA disponible dans le commerce local constitue l'apport calcique. Le sable est issu de la rivière d'Ambohimambola ; les gravillons sont utilisés après préparation granulométrique. La soude caustique est acquise localement, tandis que l'eau provient du réseau JIRAMA.

Selon les résultats de caractérisation consignés dans le manuscrit, la CBR possède une teneur massique de 90,00 % en SiO_2 ; le kaolin contient 50,62 % de SiO_2 et 32,30 % d' Al_2O_3 , tandis que la chaux présente 53,95 % de CaO . Les valeurs indiquent la fonction chimique principale de chaque constituant, sans suffire à elles seules à quantifier la fraction réellement réactive. Le sable

utilisé correspond à une classe 0/5 mm, avec un module de finesse de 2,71 ; les gravillons préparés sont décrits dans la section de caractérisation comme une classe voisine de 0/10 mm.

2.2 Prétraitements et préparation de l'activateur alcalin

Les balles de riz sont triées et séchées, puis brûlées dans un incinérateur artisanal en briques autour de 600 °C. Les cendres obtenues sont broyées, tamisées et conditionnées. Le kaolin est calciné à 750 °C pendant trois heures pour produire le métakaolin. La chaux et les granulats sont préparés et conservés à l'abri d'une reprise d'humidité non contrôlée.

Le silicate de sodium est préparé au laboratoire par introduction progressive de CBR dans une solution aqueuse de soude, suivie d'un maintien à 100 °C pendant cinq minutes et d'un refroidissement préalable à son utilisation. Dans cette étude, le rapport molaire de l'activateur est défini par $R_m = n(\text{SiO}_2)/n(\text{Na}_2\text{O})$. L'utilisation de la CBR comme composant du liant et comme source siliceuse de l'activateur constitue une double voie de valorisation ; la composition analytique finale de l'activateur n'étant pas fournie dans les tableaux disponibles, le rapport molaire est considéré ici comme paramètre expérimental annoncé, et non recalculé.

2.3 Plan expérimental de formulation

L'optimisation est conduite de manière séquentielle. Le premier ensemble d'essais porte sur $R_m = 1,25 ; 1,50 ; 1,75$ et 2,00. Les résultats mécaniques conduisent à retenir $R_m = 1,50$. Le deuxième ensemble fait varier les proportions de CBR, de MK et de chaux, avec maintien des quantités de granulats, d'eau et de silicate de sodium du plan de référence. Enfin, l'influence du couple eau de gâchage-silicate de sodium est examinée séparément. Cette dernière série identifie l'essai 9 comme le meilleur en compression dans sa propre série, mais la section consacrée à la durabilité retient explicitement la formulation F5, et non l'essai 9. Les deux étapes ne sont donc pas fusionnées artificiellement.

Tableau 1. Compositions principales des formulations étudiées (proportions en %).

Essai	Sable	Gravillon	CBR	MK	Chaux	Eau	Silicate
F5	13	24	10	8	8	10	27
F6	13	24	12	8	6	10	27
F7	13	24	12	7	7	10	27
F8	13	24	12	6	8	10	27
E9	13	24	10	8	8	8	29
E10	13	24	10	8	8	6	31
E11	13	24	10	8	8	12	25
E12	13	24	10	8	8	14	23

Note : les proportions présentées totalisent 100 % pour chaque formulation. F5 est la formulation choisie pour les essais acides ; E9 à E12 constituent une série paramétrique distincte.

2.4 . Confection des éprouvettes et conditions d'exposition

Les constituants solides sont préalablement pesés, homogénéisés à sec puis malaxés avec la solution d'activation jusqu'à l'obtention d'un mélange uniforme. Les moules métalliques prismatiques mesurent 40 × 40 × 160 mm. Les éprouvettes sont compactées mécaniquement sur table vibrante ; le démoulage intervient après 24 heures en environnement protégé. Les échantillons sont ensuite conservés à l'air libre ou immergés dans le milieu d'essai selon le protocole retenu.

Pour l'étude de la durabilité, quatre conditions acides sont examinées : HCl à 5 %, HCl à 10 %, H₂SO₄ à 5 % et H₂SO₄ à 10 %. Chaque condition est évaluée après 7 et 14 jours d'immersion, pour les bétons géopolymères et pour des bétons ordinaires

témoins. La dénomination BA1–BA8 distingue la nature du liant et les conditions acides ; elle ne représente pas huit compositions géopolymères différentes. La formulation géopolymère utilisée dans cette comparaison correspond à F5 (CBR 10 %, MK 8 %, chaux 8 %, eau 10 %, silicate 27 %, sable 13 %, gravillon 24 % ; $R_m = 1,50$).

Tableau 2. Codification des séries d'éprouvettes pour l'évaluation de la durabilité chimique.

Code	Type de béton	Acide	Concentration
BA1	Géopolymère	HCl	5 %
BA2	Ordinaire	HCl	5 %
BA3	Géopolymère	HCl	10 %
BA4	Ordinaire	HCl	10 %
BA5	Géopolymère	H ₂ SO ₄	5 %
BA6	Ordinaire	H ₂ SO ₄	5 %
BA7	Géopolymère	H ₂ SO ₄	10 %
BA8	Ordinaire	H ₂ SO ₄	10 %

2.5 . Indicateurs physiques et mécaniques

Les dimensions des éprouvettes sont relevées à l'aide d'un pied à coulisse et leurs masses mesurées avec une balance de précision. La perte de masse est calculée par $P_m = 100 \times (m_0 - m_i)/m_0$, où m_0 et m_i désignent les masses avant et après exposition. Le retrait volumique est calculé par $R_v = 100 \times (V_0 - V_i)/V_0$, les volumes étant déduits des dimensions mesurées. La masse volumique apparente est égale au rapport entre la masse et le volume apparent au moment du mesurage. La résistance à la compression est obtenue à partir de la charge maximale de rupture et de la section sollicitée, au moyen d'une presse universelle Wolpert Testwell.

Les résistances à la compression à 7 jours sont consignées pour deux mesures par condition, avec une moyenne rapportée. À 14 jours, le tableau source ne fournit qu'une valeur de résistance par condition. Aucune dispersion ou incertitude associée n'est par conséquent estimée pour cette dernière échéance. Les différences sont discutées comme des tendances descriptives, sans test d'hypothèse ni conclusion de significativité statistique.

3. RÉSULTATS

3.1 Sélection du rapport molaire de l'activateur

Pour les quatre rapports molaires étudiés, la résistance moyenne à la compression vaut 5,58 MPa ($R_m = 1,25$), 6,58 MPa ($R_m = 1,50$), 5,50 MPa ($R_m = 1,75$) et 5,11 MPa ($R_m = 2,00$). La valeur maximale est atteinte à $R_m = 1,50$. Le comportement n'est donc pas monotone et suggère qu'une augmentation de la teneur relative en silice n'améliore pas nécessairement le durcissement dans les conditions considérées. Le rapport $R_m = 1,50$ est conservé pour la suite de l'optimisation ; cette sélection demeure propre au système de matières premières et au protocole utilisés.

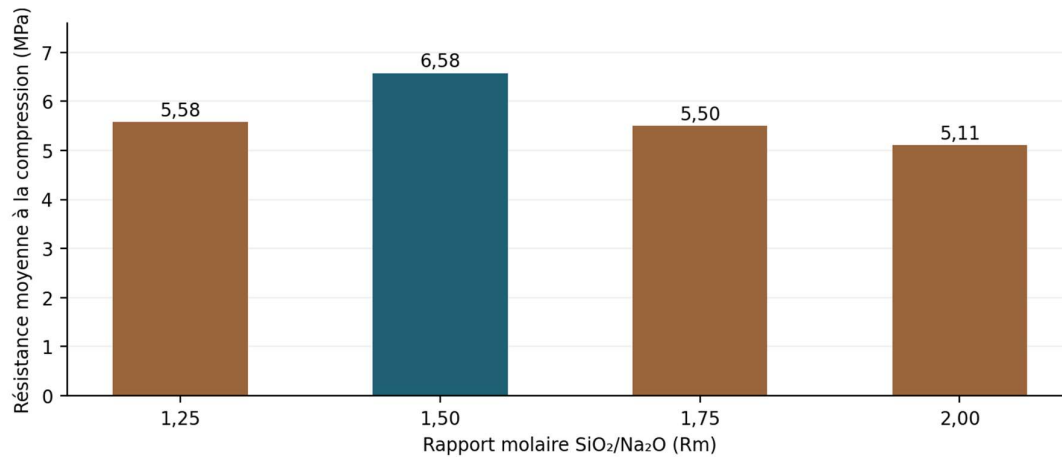


Figure 1. Influence du rapport molaire de l'activateur sur la résistance moyenne à la compression des bétons géopolymères

3.2 Influence des proportions de CBR, MK et chaux

La formulation F5 présente la résistance moyenne à la compression la plus élevée de la série de comparaison des précurseurs : 17,10 MPa, contre 14,84 MPa pour F6, 14,07 MPa pour F7 et 14,50 MPa pour F8. Elle enregistre également le plus faible retrait volumique après séchage, soit 5,48 % contre 8,40 %, 6,08 % et 6,32 % respectivement. Sa résistance en flexion rapportée est de 0,22 MPa, contre 0,14 à 0,20 MPa pour les autres compositions. En revanche, sa perte de masse après séchage (1,92 %) n'est pas minimale dans la série, et sa densité apparente (2,34) n'est pas maximale.

Ces résultats justifient le choix de F5 en privilégiant le compromis entre résistance initiale à la compression et stabilité dimensionnelle après séchage, plutôt qu'une optimisation sur un indicateur unique. Les différences entre F5 et F8 ne peuvent toutefois pas être attribuées exclusivement à la chaux, puisque plusieurs proportions changent simultanément.

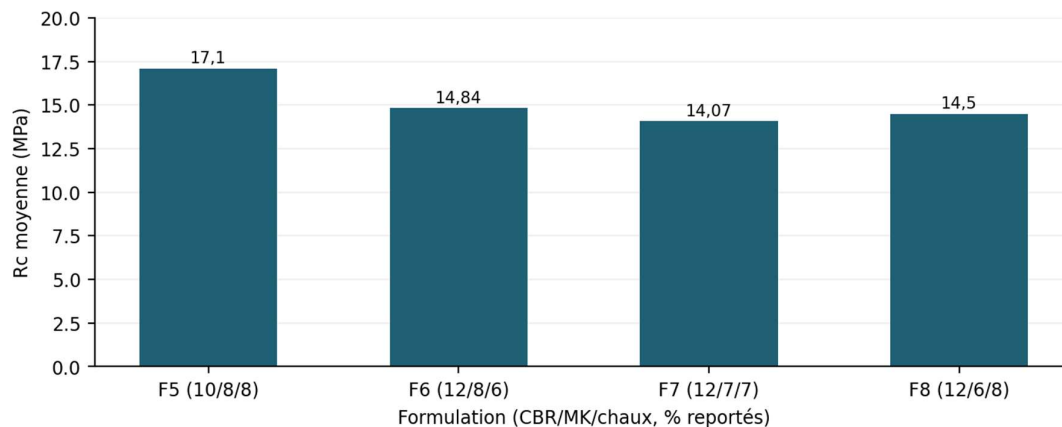


Figure 2. Résistance moyenne à la compression des formulations F5 à F8, suivant les proportions CBR/MK/chaux

3.3 . Effet du couple eau de gâchage-silicate de sodium

L'essai E9, contenant 8 % d'eau et 29 % de silicate de sodium, développe 12,19 MPa en compression dans cette troisième série, contre 11,40 MPa (E10), 11,68 MPa (E11) et 10,36 MPa (E12). La valeur la plus élevée en flexion, 0,39 MPa, est également observée pour E9. La perte massique minimale après séchage revient néanmoins à E10 (0,60 %), tandis que le retrait volumique le

plus faible est observé pour E9 (8,62 %). Ainsi, l'amélioration des performances mécaniques n'est pas identique à l'amélioration systématique de tous les paramètres physiques. L'essai E9 n'a pas été utilisé comme formulation de référence pour l'étude d'agression acide décrite ci-dessous.

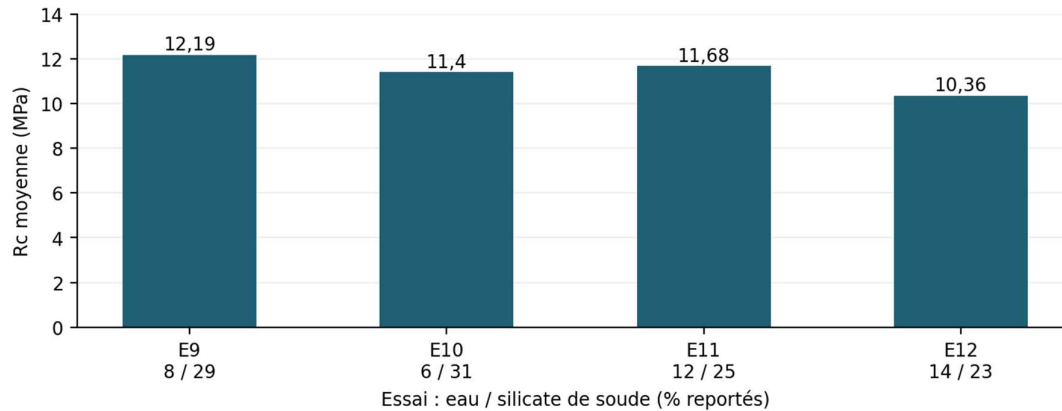


Figure 3. Résistance moyenne à la compression en fonction des teneurs en eau et silicate de sodium

3.4 . Évolution des pertes massiques sous attaques acides

Les pertes de masse des bétons géopolymères restent comprises entre 2,45 et 4,08 % après 7 jours, et entre 5,14 et 10,46 % après 14 jours. Aux mêmes échéances, les bétons ordinaires présentent des pertes respectives de 7,05 à 21,41 %, puis de 14,40 à 48,04 %. Chaque comparaison effectuée à nature et concentration d'acide identiques est favorable au béton géopolymère. Après 14 jours sous HCl à 10 %, par exemple, la perte massique est de 8,17 % pour BA3, contre 44,23 % pour BA4 ; sous H₂SO₄ à 10 %, elle est de 10,46 % pour BA7, contre 48,04 % pour BA8.

L'aggravation de l'altération avec la durée se manifeste dans les quatre environnements expérimentaux. Pour les bétons géopolymères, la perte sous HCl à 5 % passe de 2,45 % à 5,14 %, celle sous HCl à 10 % de 3,12 % à 8,17 %, celle sous H₂SO₄ à 5 % de 3,58 % à 8,34 % et celle sous H₂SO₄ à 10 % de 4,08 % à 10,46 %. Le résultat le plus pénalisant pour cette famille est observé sous H₂SO₄ à 10 %, ce qui traduit une interaction entre le type d'acide et sa concentration dans l'intervalle d'exposition étudié.

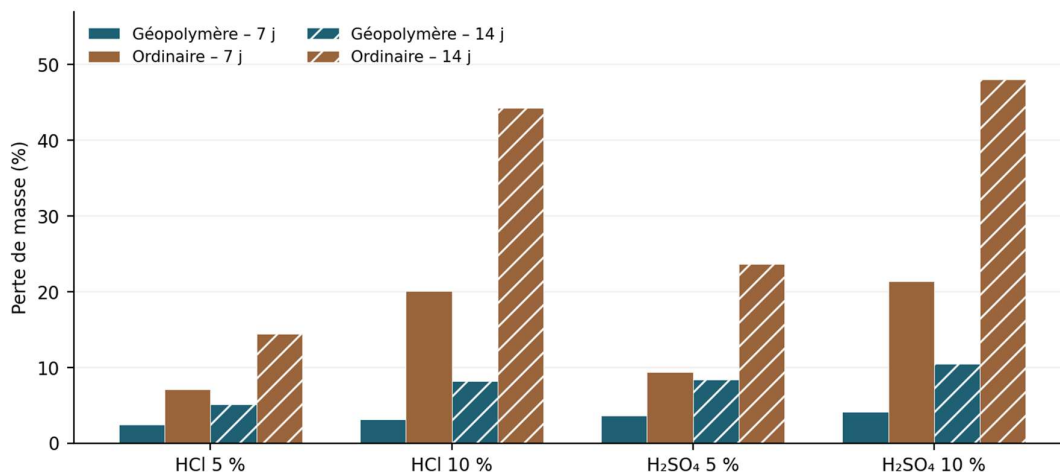


Figure 4. Comparaison des pertes massiques à 7 et 14 jours : bétons géopolymères et ordinaires sous HCl et H₂SO₄

3.5 . Résistance à la compression après exposition

Les bétons géopolymères exposés pendant 7 jours présentent des résistances comprises entre 21,91 et 24,65 MPa, alors que celles des bétons ordinaires se situent entre 10,79 et 13,23 MPa. À cette échéance, la plus forte résistance est mesurée pour le béton géopolymère sous H₂SO₄ à 5 % (BA5 : 24,65 MPa), suivie de BA1 (23,01 MPa), BA3 (22,11 MPa) et BA7 (21,91 MPa). Cette hiérarchie montre que l'acide sulfurique n'est pas systématiquement associé à la valeur mécanique la plus faible pour toutes les concentrations et durées.

Après 14 jours, les résistances du groupe géopolymère restent comprises entre 18,43 et 20,56 MPa, contre 6,92 à 12,81 MPa pour les bétons ordinaires. Le maximum du groupe géopolymère correspond à BA1 (HCl 5 % : 20,56 MPa) et le minimum à BA7 (H₂SO₄ 10 % : 18,43 MPa). Dans les quatre conditions, la résistance mesurée à 14 jours est inférieure à celle rapportée pour la condition correspondante à 7 jours ; la diminution est particulièrement marquée pour BA5, de 24,65 à 19,23 MPa. Cette comparaison est faite entre résultats d'échéances distinctes et non entre mesures répétées sur une même éprouvette.

Tableau 3. Comparaison de la résistance moyenne à la compression après exposition (MPa).

Milieu d'immersion	GP 7 j	Ord. 7 j	GP 14 j	Ord. 14 j
HCl 5 %	23,01	10,79	20,56	10,30
HCl 10 %	22,11	13,23	20,11	12,81
H ₂ SO ₄ 5 %	24,65	11,64	19,23	10,77
H ₂ SO ₄ 10 %	21,91	10,83	18,43	6,92

GP : béton géopolymère ; Ord. : béton ordinaire

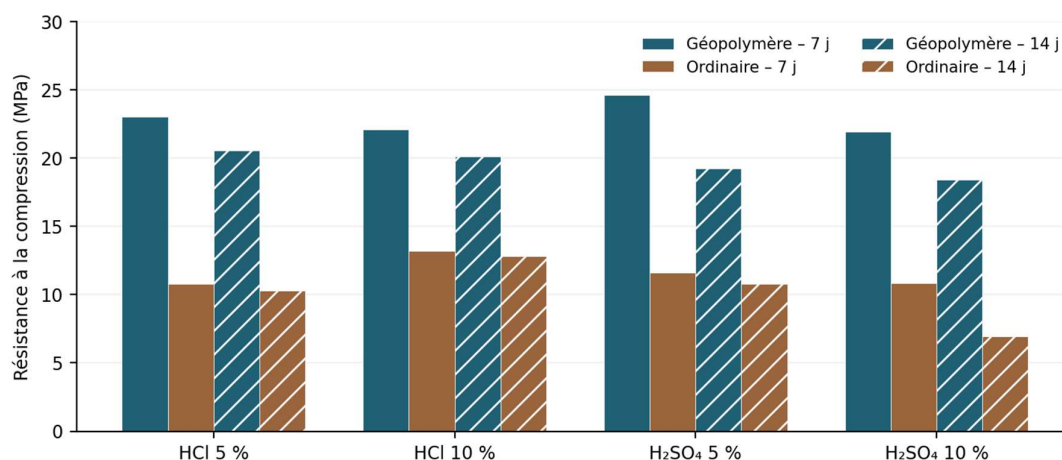


Figure 5. Résistance à la compression des bétons géopolymères et ordinaires après 7 et 14 jours d'immersion acide (données du tableau 3).

3.6 . Évolution du retrait volumique en milieu acide

À 7 jours d'immersion, les retraits volumiques sont compris entre 8,21 % et 13,26 % pour les bétons géopolymères, contre 11,24 % à 46,21 % pour les bétons ordinaires. Après 14 jours d'exposition, les retraits volumiques des bétons géopolymères varient de 12,51 % à 24,53 %, tandis que ceux des bétons ordinaires atteignent 16,63 % à 49,01 %.

La figure 6 illustre cette évolution en fonction de la nature et de la concentration du milieu acide ainsi que de la durée d'immersion. Les résultats montrent que les bétons géopolymères présentent systématiquement des retraits volumiques inférieurs à ceux des bétons ordinaires soumis aux mêmes conditions d'exposition. Toutefois, l'évolution du retrait n'est pas strictement proportionnelle à la concentration de l'acide, notamment sous H₂SO₄, où le béton géopolymère présente un retrait de 14,40 % à 5 %, contre 13,25 % à 10 % après 14 jours. Globalement, ces observations mettent en évidence une meilleure stabilité volumique des bétons géopolymères face aux agressions chimiques, particulièrement lors d'une exposition prolongée.

Tableau 4. Retraits volumiques à 14 jours calculés à partir des volumes mesurés.

Code	V ₀ (cm ³)	V _t (cm ³)	Rv (%)
BA1	210,46	184,14	12,51
BA2	217,51	181,33	16,63
BA3	232,67	175,60	24,53
BA4	222,14	135,00	39,23
BA5	223,24	191,10	14,40
BA6	224,96	152,77	32,09
BA7	218,88	189,87	13,25
BA8	237,27	120,99	49,01

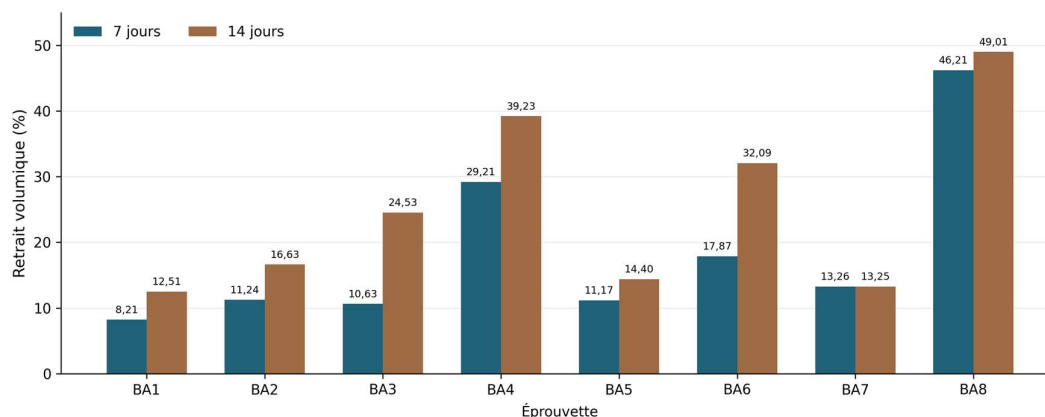


Figure 6. Évolution du retrait volumique après 7 et 14 jours d'immersion dans les milieux acides étudiés.

3.7 . Masse volumique apparente : interprétation conjointe des indicateurs

Après 7 jours, les densités apparentes mentionnées dans la thèse se situent entre 2,07 et 3,12 ; à 14 jours, entre 1,89 et 2,50. Une valeur élevée ne constitue pas automatiquement la preuve d'une matrice devenue plus compacte : elle peut résulter de la diminution proportionnellement plus rapide du volume géométrique par rapport à la masse. L'exemple de BA8 à 7 jours est particulièrement instructif : malgré une perte massique de 21,41 % et un retrait volumique de 46,21 %, sa masse volumique apparente calculée atteint environ 3,12. Ce rapport arithmétique ne caractérise ni la porosité ouverte ni l'état microstructural interne. Les interprétations de la dégradation chimique s'appuient donc prioritairement sur la lecture combinée des pertes de masse, variations dimensionnelles et résistances mécaniques.

4. . DISCUSSION

4.1 . Comparaison des deux familles de bétons

Les écarts de perte massique entre bétons géopolymères et bétons ordinaires demeurent particulièrement importants à 14 jours. Sous HCl à 5 %, la perte du témoin ordinaire est environ 2,80 fois celle du béton géopolymère ; sous HCl à 10 %, environ 5,41 fois. Sous H₂SO₄ à 5 et 10 %, ces rapports sont respectivement proches de 2,83 et 4,59. Dans les mêmes milieux, les rapports de résistance à la compression GP/ordinaire à 14 jours sont approximativement 2,00 ; 1,57 ; 1,79 ; et 2,66. Ces calculs descriptifs mettent en évidence un avantage relatif au système étudié, sans constituer des facteurs universels transposables à d'autres formulations ou âges.

L'analyse comparative des retraits volumiques met en évidence une meilleure stabilité dimensionnelle des bétons géopolymères par rapport aux bétons ordinaires dans l'ensemble des conditions d'exposition étudiées. Après 14 jours d'immersion, les retraits des bétons géopolymères varient de 12,51 % à 24,53 %, contre 16,63 % à 49,01 % pour les bétons ordinaires. Toutefois, l'influence de la concentration acide n'est pas uniforme selon la nature du milieu agressif. Sous HCl, l'augmentation de la concentration de 5 à 10 % entraîne une augmentation sensible du retrait volumique des bétons géopolymères, tandis que sous H₂SO₄, une légère diminution est observée. De même, l'évolution temporelle n'est pas strictement monotone pour toutes les conditions d'exposition, notamment pour BA7, dont le retrait reste pratiquement stable entre 7 et 14 jours. Ces observations suggèrent que les modifications dimensionnelles résultent d'interactions complexes entre la nature du milieu acide, les caractéristiques de la matrice et les mécanismes d'altération. Elles montrent également que les indicateurs de dégradation physique et mécanique ne présentent pas nécessairement des évolutions identiques, ce qui justifie leur analyse complémentaire dans l'évaluation de la durabilité chimique.

Les résultats rejoignent qualitativement les observations antérieures sur le comportement des bétons géopolymères sous attaque sulfurique [6] et les synthèses qui soulignent la dépendance de la durabilité à la composition et à la nature de l'environnement [2]. L'amélioration relative observée ici ne doit cependant pas être attribuée de façon certaine à une phase réactionnelle particulière : l'étude de la composition chimique de départ ne suffit pas à démontrer la présence ni la stabilité de gels de type N–A–S–H ou C–(A)–S–H après immersion.

4.2 . Influence de la nature de l'acide et des paramètres d'exposition

La perte de masse augmente systématiquement lorsque la concentration passe de 5 à 10 %, à durée et famille de béton identiques. L'accroissement est également observé entre les deux échéances d'immersion. Pour les géopolymères, la condition H_2SO_4 à 10 % produit la plus forte perte massique à 7 jours (4,08 %) et à 14 jours (10,46 %). Après 14 jours, elle conduit également à la résistance à la compression la plus faible de cette famille (18,43 MPa). L'interprétation doit néanmoins distinguer une observation sous conditions expérimentales définies d'une hiérarchie universelle de l'agressivité des acides. En effet, à 7 jours et 5 % d'acide, le béton exposé à H_2SO_4 présente une résistance en compression supérieure à celle exposée à HCl ; les cinétiques de réactions secondaires et les états de maturation ne sont pas indépendamment mesurés.

La différence entre les mécanismes potentiels des deux acides mérite donc une discussion prudente. Une attaque acide peut entraîner une lixiviation des constituants mobiles, une désalumination du réseau et, en présence de calcium, une décalcification de certaines phases. Dans le cas de H_2SO_4 , la formation éventuelle de produits sulfatés peut modifier localement les processus de fissuration ou de désagrégation. Ces voies mécanistiques sont compatibles avec la littérature [1], [2], [6], mais n'ont pas fait l'objet d'une identification analytique directe dans les séries présentées ; elles constituent des hypothèses explicatives et non des résultats expérimentaux établis par DRX, MEB ou FTIR.

4.3 . Apport scientifique et limites de l'étude

L'approche expérimentale associe trois aspects : l'utilisation de cendre de balle de riz pour contribuer au liant et à l'activateur, l'incorporation de métakaolin local et de chaux, et une comparaison croisée sous deux acides à deux concentrations. Cette configuration apporte des résultats utiles à l'évaluation de formulations adaptées aux ressources de Madagascar. L'intérêt environnemental potentiel de la valorisation agricole ne constitue toutefois pas en lui-même une preuve de réduction d'empreinte carbone : la combustion des balles de riz, la calcination du kaolin et la synthèse alcaline devront faire l'objet d'une analyse énergétique et environnementale spécifique. Les mesures de compression à 14 jours ne comportent qu'une valeur par condition, sans estimation de dispersion. Les deux échéances concernent des groupes d'éprouvettes distincts : un écart de 0,01 point de pourcentage comme celui de BA7 ne permet pas de conclure à une évolution temporelle significative.

5. . CONCLUSION

Les résultats expérimentaux étudiés montrent que l'association CBR–métakaolin–chaux, activée par une solution de silicate de sodium préparée à partir de cendre de balle de riz, permet d'obtenir un béton géopolymère présentant un comportement comparativement favorable sous attaques acides de courte durée. Le rapport molaire $R_m = 1,50$ et la formulation F5 (10 % CBR, 8 % MK, 8 % chaux) ont été retenus à l'issue des étapes de sélection. Après 14 jours dans des solutions de HCl et H_2SO_4 à 5 et 10 %, les bétons géopolymères présentent des pertes de masse de 5,14 à 10,46 % et des résistances à la compression de 18,43 à 20,56 MPa ; les bétons ordinaires correspondants enregistrent 14,40 à 48,04 % de perte massique et des résistances de 6,92 à 12,81 MPa.

L'augmentation de la concentration et de la durée d'exposition accroît globalement l'altération. La solution H_2SO_4 à 10 % correspond, pour les bétons géopolymères, à la condition la plus pénalisante selon les critères de perte de masse et de compression à 14 jours.

Les retraits volumiques à 14 jours sont inférieurs pour les bétons géopolymères (12,51 à 24,53 %) à ceux des témoins ordinaires (16,63 à 49,01 %) dans chaque milieu acide. Leur évolution non systématiquement croissante selon l'acide, sa concentration et la durée souligne l'intérêt d'une évaluation conjointe des propriétés physiques et mécaniques. L'ensemble des résultats encourage la

poursuite des recherches sur les ressources locales comme précurseurs des liants alternatifs. La confirmation de la base des dosages, l'estimation des dispersions expérimentales, la caractérisation microstructurale et des expositions prolongées sont nécessaires avant toute transposition aux ouvrages en service.

RÉFÉRENCES

- [1] Provis, J. L. (2018). Alkali-activated materials. *Cement and Concrete Research*, 114, 40–48. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.02.009>
- [2] Wong, L. S. (2022). Durability performance of geopolymer concrete: A review. *Polymers*, 14(5), Article 868. <https://doi.org/10.3390/polym14050868>
- [3] 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*, 42, 2917–2933. <https://doi.org/10.1007/s10853-006-0637-z>
- [4] Tchakouté, H. K., Rüschler, C. H., Kong, S., Kamseu, E., & Leonelli, C. (2016). Geopolymer binders from metakaolin using sodium waterglass from waste glass and rice husk ash as alternative activators: A comparative study. *Construction and Building Materials*, 114, 276–289. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.184>
- [5] Ratsimbazafy, H. M., Koera, A. R., Ratsarahasina, D. M., Ranaivosoloarimalala, A. M. S., Rakotomalala, Z., Rakotosaona, R. L., & Ranaivoniarivo, V. G. (2020). Étude et essai de fabrication de matériaux géopolymériques à base de cendres de balles de riz qui résistent aux agressions chimiques. *International Journal of Progressive Sciences and Technologies*, 21(2). <https://doi.org/10.52155/ijpsat.v21.2.1947>
- [6] Ariffin, M. A. M., Bhutta, M. A. R., Hussin, M. W., Mohd Tahir, M., & Aziah, N. (2013). Sulfuric acid resistance of blended ash geopolymer concrete. *Construction and Building Materials*, 43, 80–86. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.01.018>
- [7] Kannan, V., & Ganesan, K. (2014). Chloride and chemical resistance of self compacting concrete containing rice husk ash and metakaolin. *Construction and Building Materials*, 51, 225–234. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.10.050>