International Journal of Progressive Sciences and Technologies (IJPSAT)
ISSN: 2509-0119.
© 2026 Scholar AI LLC.
https://ijpsat.org/
Vol. 59 No. 2 October 2026, pp. 874-886

Modélisation Mathématique, Analyse Prédictive Et Simulation De La Durabilité Chimique Des Mortiers Et Bétons Géopolymères En Fonction De La Nature De L'acide, De Sa Concentration Et De La Durée D'exposition

[Mathematical Modeling, Predictive Analysis and Simulation of the Chemical Durability of Geopolymer Mortars and Concretes as a Function of Acid Type, Concentration and Exposure Duration]

RAZAFY Nomenjanahary Rivo[1], KOERA Rasoloniaina Antoine[2], RATSIMBAZAFY Hery Mikaela[3], RAKOTOMALALA Zolimboahangy[4], RANDRIANA Nambinina Richard Fortuné[5]

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

CC BY

Résumé: Cette recherche développe une approche quantitative de la durabilité chimique de mortiers et bétons géopolymères incorporant de la cendre de balle de riz et du métakaolin. Pour chacun des deux matériaux, huit conditions expérimentales associent deux acides (HCl et H_2SO_4), deux concentrations (5 et 10 %) et deux durées d'immersion (7 et 14 jours). Trois réponses sont considérées : la perte de masse, le retrait volumique et la résistance à la compression après exposition. Six relations empiriques multiplicatives sont identifiées au moyen d'une régression sur les logarithmes des mesures. Les ajustements obtenus présentent des coefficients de détermination de 0,9372 à 0,9526 pour les mortiers, et de 0,5269 à 0,9826 pour les bétons, selon la réponse étudiée. Les équations sont intégrées à deux outils de simulation, sous Excel et Python/Streamlit, permettant l'exploration de scénarios d'exposition intermédiaires. Les tendances estimées traduisent généralement l'accroissement des pertes de masse et la diminution des résistances mécaniques lorsque l'intensité d'exposition augmente. Toutefois, le retrait volumique du béton est insuffisamment décrit par le modèle simplifié. Ces résultats constituent une représentation empirique des données étudiées, non une validation prédictive sur des observations indépendantes.

Mots-clés : cendre de balle de riz ; mortier géopolymère ; béton géopolymère ; loi de puissance ; régression ; durabilité acide ; retrait volumique ; simulation.

Abstract: Background: The durability of geopolymer construction materials under acidic exposure depends on chemical environment and exposure time. This study aims to formulate and evaluate empirical models describing the chemical durability of rice husk ash–metakaolin geopolymer mortars and concretes, and to translate these relationships into practical simulation tools. Methods: Eight experimental conditions were considered for each material, combining hydrochloric or sulfuric acid, concentrations of 5% or 10%, and exposure periods of 7 or 14 days. Mass loss, volumetric shrinkage, and compressive strength after immersion were described using separate multiplicative power-law equations. Model parameters were estimated by ordinary least squares on logarithmically

International Journal of Progressive Sciences and Technologies (IJPSAT)
ISSN: 2509-0119.
© 2026 Scholar AI LLC.
https://ijpsat.org/
Vol. 59 No. 2 October 2026, pp. 874-886

transformed data; goodness of fit was assessed in the original measurement scale. Results: The mortar models yielded coefficients of determination ranging from 0.9372 to 0.9526. For concrete, the values were 0.9826 for mass loss, 0.8616 for compressive strength, and 0.5269 for volumetric shrinkage. Model-based simulations were implemented in Excel and Python/Streamlit. Overall, mass loss increased with acid concentration and exposure duration, whereas estimated compressive strength decreased. Concrete shrinkage exhibited non-monotonic experimental variations that were poorly captured by the simplified model. Conclusions: The models provide a quantitative framework for comparing short-term acidic exposure conditions for the selected formulations. Their predictions are exploratory, restricted to the experimental domain, and require independent validation before engineering extrapolation.

Keywords: Alkali activation; Rice husk ash; Metakaolin; Regression; Mass loss; Volumetric shrinkage; Compressive strength; Streamlit.

1. INTRODUCTION

Les attaques acides constituent une cause d'altération des matériaux cimentaires utilisés notamment dans les réseaux d'assainissement, les environnements industriels et certaines infrastructures hydrauliques. Les pertes de matière, les transformations de la matrice et les modifications de résistance ne sont pas nécessairement corrélées de manière simple. L'évaluation de la durabilité chimique implique donc l'examen simultané de plusieurs indicateurs physiques et mécaniques [1], [2].

Les liants obtenus par activation alcaline de ressources aluminosilicatées sont étudiés comme alternatives aux systèmes conventionnels à base de ciment Portland. La composition des précurseurs, l'activateur et la présence éventuelle de phases calciques influencent les produits réactionnels et la sensibilité aux milieux corrosifs [3]. Les travaux sur la durabilité des mortiers géopolymères exposés aux acides ont notamment montré que les réponses mécaniques, massiques et microstructurales dépendent du milieu et de la formulation [4], [5].

La cendre de balle de riz (CBR) possède un intérêt particulier pour la valorisation locale des résidus agricoles : elle peut contribuer à la fraction siliceuse des mélanges et servir de matière première pour l'élaboration d'une solution de silicate de sodium [6]. Dans les formulations étudiées ici, la CBR est associée au métakaolin (MK) et, pour les bétons, à la chaux (CX). La présente contribution n'a pas pour objet de reprendre exhaustivement l'optimisation des formulations : elle exploite les formulations déjà sélectionnées lors du programme expérimental afin de construire une représentation mathématique de leurs réponses aux agressions acides.

La littérature aborde la dégradation par divers environnements et des outils de description quantitative, notamment à partir d'essais de corrosion de mortiers géopolymères [7]. Il reste néanmoins important de distinguer, dans chaque série expérimentale, la description statistique des données d'étalonnage, les simulations numériques qui en découlent et la validation sur de nouveaux essais. Cette distinction est particulièrement décisive lorsque le nombre de conditions étudiées est restreint.

L'objectif de l'article consiste à (i) consolider les données de durabilité des mortiers et bétons géopolymères retenus, (ii) identifier six modèles empiriques reliant trois paramètres d'exposition à trois réponses, (iii) apprécier leurs performances d'ajustement et leurs limites, et (iv) illustrer leur exploitation au moyen de simulations sous Excel et Python/Streamlit. L'originalité de cette contribution réside principalement dans cette chaîne intégrée de traitement expérimental, d'identification mathématique et de visualisation, appliquée séparément aux deux matériaux.

2. MATÉRIAUX, DONNÉES ET MÉTHODOLOGIE

2.1. Matériaux étudiés et sélection des formulations

Les données utilisées proviennent des essais de durabilité chimique consignés au chapitre IV du travail doctoral. Les mortiers géopolymères correspondent à la formulation F7, sélectionnée à l'issue de l'étude du rapport massique CBR/MK (100/40) et avec un rapport molaire SiO_2/Na_2O (Rm) égal à 2,0. Les bétons géopolymères correspondent à la formulation BAL5 issue de l'essai n°

International Journal of Progressive Sciences and Technologies (IJPSAT)
ISSN: 2509-0119.
© 2026 Scholar AI LLC.
https://ijpsat.org/
Vol. 59 No. 2 October 2026, pp. 874-886

5 (CBR : 10 % ; MK : 8 % ; CX : 8 %), élaborée avec un Rm égal à 1,50. Ces pourcentages décrivent les teneurs de formulation telles que rapportées dans la thèse ; ils ne constituent pas des variables libres dans les équations présentées ici.

Les éprouvettes ont été soumises à des solutions aqueuses d'acide chlorhydrique et d'acide sulfurique. Les résultats des matériaux ordinaires à base de ciment Portland servent de comparaison expérimentale dans le programme général, mais ne sont pas intégrés aux bases utilisées pour identifier les coefficients des modèles propres aux matériaux géopolymères.

2.2. Plan d'exposition et constitution de la base

Le plan considéré croise deux modalités de nature d'acide (HCl et H_2SO_4), deux niveaux de concentration (5 % et 10 %) et deux durées d'immersion (7 et 14 jours). Cela conduit à huit combinaisons pour le mortier et huit pour le béton, soit 16 conditions matériau–exposition. L'observation du mortier sous HCl à 5 % pendant 7 jours est reprise d'un essai préliminaire effectivement réalisé sur F7 ; elle n'a pas été interpolée. Chaque ligne de la base constitue ici une condition d'exposition, et non une estimation du nombre total d'éprouvettes individuelles.

Tableau 1. Matrice expérimentale des mortiers géopolymères F7 utilisée pour la modélisation.

Code	Échant.	Acide	C (%)	t (j)	Pm (%)	Rv (%)	Rc (MPa)
E1	F7	HCl	5	7	1,98	4,20	10,70
E2	MA9	HCl	10	7	2,86	6,87	10,28
E3	MA1	H_2SO_4	5	7	2,73	6,84	10,61
E4	MA7	H_2SO_4	10	7	3,49	9,78	9,95
E5	MA5	HCl	5	14	2,91	8,81	9,95
E6	MA13	HCl	10	14	3,23	23,17	9,44
E7	MA3	H_2SO_4	5	14	4,55	19,59	9,52
E8	MA11	H_2SO_4	10	14	5,58	48,90	8,71

Tableau 2. Matrice expérimentale des bétons géopolymères BAL5 utilisée pour la modélisation.

Code	Échant.	Acide	C (%)	t (j)	Pm (%)	Rv (%)	Rc (MPa)
E1	BA1	HCl	5	7	2,45	8,21	23,01
E2	BA3	HCl	10	7	3,12	10,63	22,11
E3	BA5	H_2SO_4	5	7	3,58	11,17	24,65
E4	BA7	H_2SO_4	10	7	4,08	13,26	21,91
E5	BA1	HCl	5	14	5,14	12,51	20,56
E6	BA3	HCl	10	14	8,17	24,53	20,11
E7	BA5	H_2SO_4	5	14	8,34	14,40	19,23
E8	BA7	H_2SO_4	10	14	10,46	13,25	18,43

International Journal of Progressive Sciences and Technologies (IJPSAT)
ISSN: 2509-0119.
© 2026 Scholar AI LLC.
https://ijpsat.org/
Vol. 59 No. 2 October 2026, pp. 874-886

Les huit observations de chaque matériau proviennent de la base retenue au chapitre V, en cohérence avec les tableaux expérimentaux du chapitre IV. Les retraits volumiques des bétons à 14 jours correspondent exclusivement aux valeurs recalculées : 12,51 % (BA1), 24,53 % (BA3), 14,40 % (BA5) et 13,25 % (BA7).

2.3. Variables explicatives et indicateurs de réponse

La nature de l'acide est codée par A = 0 pour HCl et A = 1 pour H_2SO_4. La concentration C est exprimée en pourcentage (5 ou 10), et la durée t en jours (7 ou 14). Les trois variables dépendantes sont la perte de masse Pm (%), le retrait volumique Rv (%) et la résistance à la compression après immersion Rc (MPa). Les indicateurs sont définis par les relations expérimentales suivantes :

$$Pm = [(m_0 - m_t) / m_0] \times 100 \quad (1)$$

$$Rv = [(V_0 - V_t) / V_0] \times 100 \quad (2)$$

$$Rc = Fmax / S \quad (3)$$

Dans ces expressions, m_0 et m_t désignent les masses initiale et finale ; V_0 et V_t, les volumes initial et final ; Fmax, la force maximale à rupture ; et S, la section sollicitée. Le retrait est positif lorsqu'une contraction est mesurée. La résistance Rc désigne explicitement la résistance mesurée après immersion : elle ne doit pas être assimilée à une perte relative de résistance sans témoin de même formulation et de même âge total.

2.4. Identification des équations empiriques

Pour chaque couple matériau–indicateur, le comportement est représenté par une relation multiplicative de type loi de puissance. Le choix de cette structure vise à exprimer de manière parcimonieuse les effets principaux de la nature de l'acide, de sa concentration et du temps d'exposition ; il ne constitue pas un modèle mécanistique de diffusion ou de réaction chimique.

$$\hat{Y} = K \times \exp(\alpha A) \times (C/5)^{\beta} \times (t/7)^{\gamma} \quad (4)$$

La normalisation par 5 % et 7 jours fixe la condition de référence ; K représente la réponse estimée sous HCl à 5 % après 7 jours. À concentration et durée identiques, exp(α) est le rapport des réponses estimées sous H_2SO_4 et sous HCl. Les exposants β et γ décrivent respectivement l'effet multiplicatif de la concentration et de la durée. Cette formulation ne comporte pas d'interactions explicites entre les facteurs.

$$\ln(Y) = \ln(K) + \alpha A + \beta \ln(C/5) + \gamma \ln(t/7) + \varepsilon \quad (5)$$

Les quatre paramètres sont déterminés par moindres carrés ordinaires sur les valeurs logarithmiques, puis la transformation inverse fournit les estimations sur l'échelle physique. La régression suppose des réponses strictement positives. Elle est effectuée indépendamment pour Pm, Rv et Rc, et séparément pour les deux matériaux : six jeux de coefficients sont ainsi obtenus.

2.5. Évaluation statistique et domaine de validité

$$R^2 = 1 - \Sigma(Ymes - \hat{Y})^2 / \Sigma(Ymes - \bar{Y})^2 \quad (6)$$

$$RMSE = \sqrt{[\Sigma(Ymes - \hat{Y})^2 / N]} \quad (7)$$

Les indicateurs R^2 et RMSE sont évalués sur les réponses initiales, et non sur leur logarithme. La RMSE est exprimée en MPa pour Rc et en points de pourcentage pour Pm et Rv. Comme les observations servent à la fois à estimer et à évaluer les modèles, les résultats mesurent un ajustement interne et ne décrivent pas une précision de prédiction hors échantillon.

Le domaine d'utilisation est limité aux formulations F7 et BAL5, aux deux acides considérés, aux concentrations comprises entre 5 et 10 % et aux durées de 7 à 14 jours. L'utilisation à d'autres formulations, à d'autres acides ou pour des horizons de service doit faire l'objet d'essais complémentaires. Aucune estimation à t = 0 n'est recherchée.

International Journal of Progressive Sciences and Technologies (IJPSAT)
ISSN: 2509-0119.
© 2026 Scholar AI LLC.
https://ijpsat.org/
Vol. 59 No. 2 October 2026, pp. 874-886

3. RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX ET ANALYSE DES TENDANCES

3.1. Évolution de la perte de masse et de la résistance mécanique

Pour les mortiers, la perte de masse augmente de 1,98 % (HCl, 5 %, 7 jours) à 5,58 % (H_2SO_4, 10 %, 14 jours), alors que la résistance à la compression passe respectivement de 10,70 à 8,71 MPa. À concentration de 10 % et après 14 jours, le remplacement de HCl par H_2SO_4 s'accompagne d'une perte de masse mesurée de 3,23 à 5,58 %, tandis que Rc diminue de 9,44 à 8,71 MPa. Les évolutions confirment que l'intensification du milieu d'exposition peut affecter simultanément la matière et la réponse mécanique, avec des amplitudes différentes.

Les bétons présentent, pour la perte de masse, une amplitude plus importante dans le domaine étudié : 2,45 % sous HCl à 5 % après 7 jours contre 10,46 % sous H_2SO_4 à 10 % après 14 jours. Leur résistance à la compression varie de 18,43 à 24,65 MPa selon les huit conditions. À 14 jours, les quatre résistances mesurées sont inférieures à leurs valeurs correspondantes de 7 jours. La résistance de 24,65 MPa sous H_2SO_4 à 5 % après 7 jours illustre cependant qu'un classement strictement monotone de tous les résultats selon la seule nature de l'acide ne peut être imposé.

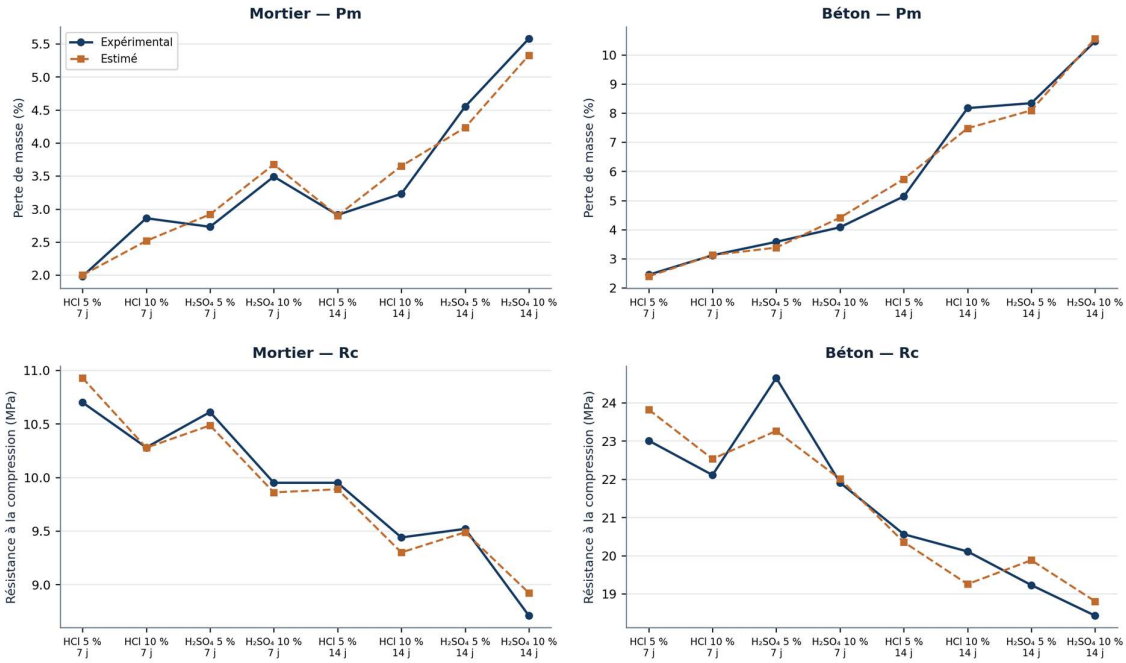


Figure 1. Confrontation des pertes de masse et des résistances à la compression mesurées et estimées pour les huit conditions de chaque matériau. Source : données expérimentales des chapitres IV–V ; calculs propres à partir des coefficients du chapitre V.

3.2. Comportement dimensionnel et vérification des données

Le retrait volumique des mortiers varie de 4,20 % à 48,90 %, avec la valeur maximale relevée sous H_2SO_4 à 10 % après 14 jours. Cette réponse présente donc une sensibilité absolue plus marquée que la perte de masse, bien que ces deux indicateurs ne puissent pas être comparés directement sans tenir compte de leur signification physique. Pour les bétons, les valeurs à 14 jours sont de 12,51 % (BA1), 24,53 % (BA3), 14,40 % (BA5) et 13,25 % (BA7). Les valeurs BA3, BA5 et BA7 correspondent aux corrections calculées à partir des volumes mesurés, et non aux pourcentages antérieurement rapportés.

Le fait que Rv(BA7, H_2SO_4 10 %, 14 jours) soit inférieur à Rv(BA5, H_2SO_4 5 %, 14 jours) révèle un comportement non monotone dans cette sous-série. Cette observation a une conséquence directe pour l'identification : une loi multiplicative sans

International Journal of Progressive Sciences and Technologies (IJPSAT)
ISSN: 2509-0119.
© 2026 Scholar AI LLC.
https://ijpsat.org/
Vol. 59 No. 2 October 2026, pp. 874-886

interaction impose, pour un acide et une durée fixés, un effet de concentration de signe constant. Elle peut donc difficilement décrire simultanément toutes les variations dimensionnelles du béton.

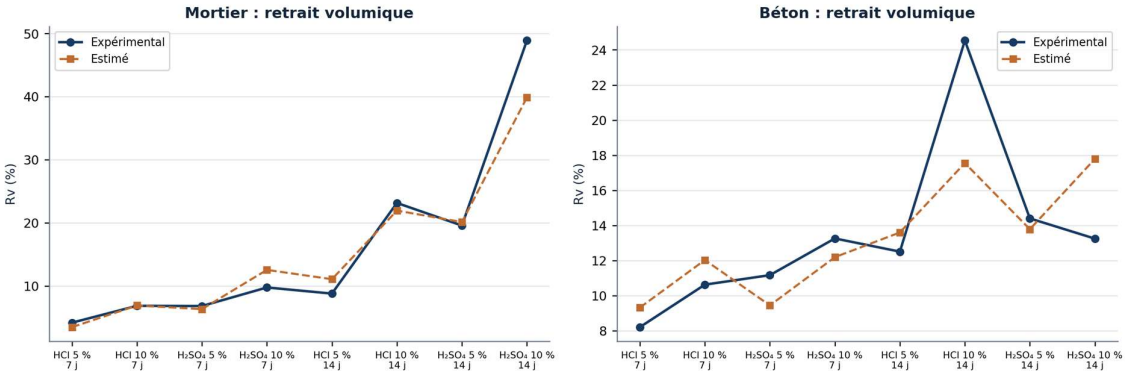


Figure 2. Retraits volumiques expérimentaux et ajustés des mortiers et bétons géopolymères ; les écarts à 14 jours soulignent la prudence nécessaire pour l'indicateur Rv. Source : tableaux expérimentaux 5-2 et 5-3 et équations identifiées.

4. IDENTIFICATION ET INTERPRÉTATION DES MODÈLES

4.1. Coefficients estimés et expression des six relations

Les estimations logarithmiques conduisent aux six jeux de paramètres présentés au tableau 3. Chaque ligne définit une équation de forme (4), avec son propre coefficient de référence et ses exposants. Les valeurs sont fournies avec l'arrondi figurant dans le chapitre V ; de légères différences peuvent apparaître au quatrième chiffre lors du recalcul de statistiques à partir de ces paramètres arrondis.

Tableau 3. Coefficients des six modèles empiriques, par matériau et indicateur.

Matériau	Réponse	K	α	β	γ
Mortier	Perte de masse	1,9988	0,3785	0,3324	0,5363
Mortier	Retrait volumique	3,4958	0,5967	0,9851	1,6657
Mortier	Résistance en compression	10,9287	-0,0414	-0,0887	-0,1441
Béton	Perte de masse	2,3958	0,3447	0,3832	1,2590
Béton	Retrait volumique	9,3235	0,0134	0,3679	0,5448
Béton	Résistance en compression	23,8196	-0,0236	-0,0802	-0,2267

Les six relations calculatoires peuvent être reproduites de manière transparente en remplaçant dans l'équation (4) les paramètres du tableau 3. À titre d'exemple, pour le béton soumis à H_2SO_4 à 10 % après 14 jours (A = 1 ; C = 10 ; t = 14), l'équation de perte massique donne :

$$\mathbf{Pm = 2{,}3958 \times \exp(0{,}3447) \times 2\text{^}0{,}3832 \times 2\text{^}1{,}2590 \approx 10{,}56\ \%} \qquad \mathbf{(8)}$$

Cette estimation est proche de la valeur expérimentale de 10,46 %, soit un écart d'environ 0,10 point de pourcentage. Il s'agit toutefois d'une condition déjà utilisée dans la procédure d'identification.

4.2. Sensibilité interprétative des coefficients

Pour la perte de masse, les exposants β et γ sont positifs dans les deux matériaux, indiquant une augmentation de la perte massique estimée avec la concentration et le temps. L'exposant temporel du béton (γ = 1,2590) est supérieur à celui du mortier (γ = 0,5363) : la croissance relative attendue lorsque la durée double est donc plus forte dans le modèle béton. Le passage de HCl à H_2SO_4 multiplie les pertes massiques estimées par exp(0,3785) ≈ 1,46 pour le mortier et exp(0,3447) ≈ 1,41 pour le béton, toutes choses égales par ailleurs.

Pour Rc, les exposants β et γ sont négatifs dans les deux matériaux. Le doublement de la durée donne ainsi un facteur 2^(−0,1441) ≈ 0,905 pour les mortiers et 2^(−0,2267) ≈ 0,855 pour les bétons, selon les modèles. Ces facteurs décrivent la comparaison de deux résistances après immersion et ne représentent pas un taux de perte par rapport à une résistance initiale non immergée. L'effet estimé de la nature de l'acide sur Rc demeure plus modeste que sur les pertes massiques.

Pour Rv, les exposants du mortier sont positifs et élevés (β = 0,9851 ; γ = 1,6657), tandis que les valeurs du béton (β = 0,3679 ; γ = 0,5448) traduisent une réponse moyenne plus modérée. L'effet estimé de l'acide sur le retrait du béton, exp(0,0134) ≈ 1,013, est particulièrement faible dans la structure adoptée. Cela ne signifie pas l'absence d'effet physicochimique réel : le modèle agrège des observations dont la variation dépend probablement de mécanismes non représentés par les seuls effets principaux.

5. QUALITÉ D'AJUSTEMENT ET PORTÉE PRÉDICTIVE

5.1. Performance statistique sur l'échantillon d'identification

Tableau 4. Indicateurs internes de qualité d'ajustement des modèles sur l'échelle de mesure initiale.

Matériau	Réponse	N	R^2	RMSE
Mortier	Perte de masse (%)	8	0,9420	0,2569
Mortier	Retrait volumique (%)	8	0,9372	3,4822
Mortier	Rc après immersion (MPa)	8	0,9526	0,1348
Béton	Perte de masse (%)	8	0,9826	0,3627
Béton	Retrait volumique (%)	8	0,5269	3,1258
Béton	Rc après immersion (MPa)	8	0,8616	0,7160

Pour les mortiers, l'ajustement est élevé pour les trois réponses : R^2 = 0,9420 pour Pm, 0,9372 pour Rv et 0,9526 pour Rc. Malgré un R^2 élevé pour Rv, la RMSE de 3,4822 points de pourcentage signale que des écarts absolus demeurent significatifs ; l'interprétation ne doit donc pas se limiter au coefficient de détermination.

Pour les bétons, le modèle de Pm présente R^2 = 0,9826 et RMSE = 0,3627 point de pourcentage ; celui de Rc, R^2 = 0,8616 et RMSE = 0,7160 MPa. Le retrait volumique est nettement moins bien décrit (R^2 = 0,5269 ; RMSE = 3,1258 points de pourcentage). En particulier, sous HCl à 10 % et à 14 jours, BA3 présente 24,53 % de retrait mesuré contre environ 17,55 %

International Journal of Progressive Sciences and Technologies (IJPSAT)
ISSN: 2509-0119.
© 2026 Scholar AI LLC.
https://ijpsat.org/
Vol. 59 No. 2 October 2026, pp. 874-886

calculés. Pour BA7 sous H_2SO_4 à 10 % et à 14 jours, 13,25 % sont observés contre environ 17,79 % estimés. Ces écarts sont cohérents avec l'insuffisance d'une structure sans interactions pour cette grandeur.

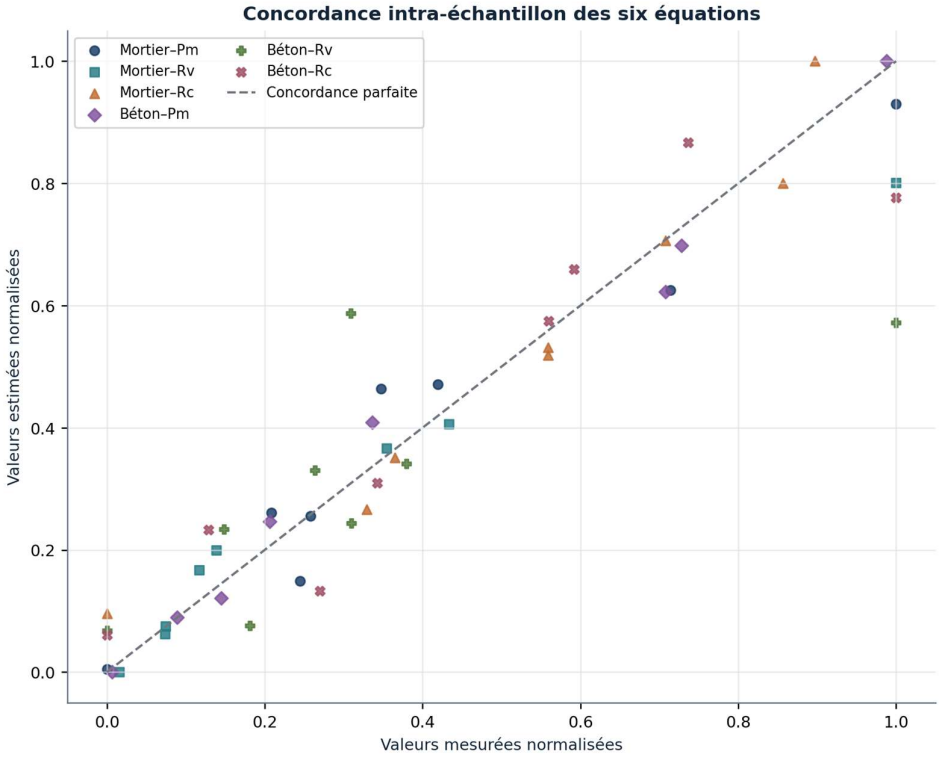


Figure 3. Corrélation normalisée entre mesures et ajustements pour les six couples matériau–réponse (normalisation distincte pour chaque couple, échelle 0–1). La droite en tirets représente la concordance parfaite. Source : Auteur

5.2. Conséquences du nombre limité d'observations

Chacun des six modèles est estimé à partir de huit observations et comporte quatre coefficients (K, α, β, γ), soit seulement quatre degrés de liberté résiduels dans le cadre de la régression linéaire sur les logarithmes. Le plan 2 × 2 × 2 permet d'estimer les effets principaux de façon équilibrée, mais le modèle choisi ne représente ni les interactions acide–concentration, acide–durée ou concentration–durée, ni d'éventuelles non-linéarités plus complexes. Il serait donc excessif de conclure à une performance prédictive généralisable sur la base des seuls R^2 obtenus.

En l'absence d'un jeu de validation séparé, d'essais répétables indépendants ou d'une évaluation prospective, la « prédiction » doit être comprise ici comme la réponse calculée par un modèle identifié sur les mêmes données. Une validation complémentaire pourra porter sur de nouvelles concentrations intermédiaires, d'autres temps d'immersion et de nouvelles éprouvettes de formulation strictement identique. Un enrichissement méthodologique pourrait ensuite tester des termes d'interaction et examiner l'incertitude des coefficients.

6. SIMULATION NUMÉRIQUE DES SCÉNARIOS D'EXPOSITION

6.1. Principe et outils de simulation

Deux interfaces d'exploitation des équations ont été développées dans le travail doctoral : un simulateur sous Microsoft Excel pour la saisie et la lecture immédiate des estimations, et une application Python reposant sur Streamlit pour la modification

International Journal of Progressive Sciences and Technologies (IJPSAT)
ISSN: 2509-0119.
© 2026 Scholar AI LLC.
https://ijpsat.org/
Vol. 59 No. 2 October 2026, pp. 874-886

interactive des entrées et la représentation graphique des réponses. L'utilisateur sélectionne d'abord le matériau, puis l'acide, la concentration et la durée. Les équations correspondantes fournissent Pm, Rv et Rc dans les unités expérimentales ; les calculs restent conditionnés aux domaines de validité rappelés à la section 2.5.

Les figures 4 à 6 sont des visualisations recalculées pour cet article à partir des coefficients du tableau 3 ; elles n'ajoutent pas de données expérimentales. Les courbes explorent des concentrations intermédiaires comprises entre 5 et 10 %, à 7 et 14 jours. Les points superposés représentent uniquement les mesures réalisées aux concentrations 5 et 10 % ; il convient de ne pas les confondre avec des validations indépendantes.

6.2. Scénarios de perte de masse

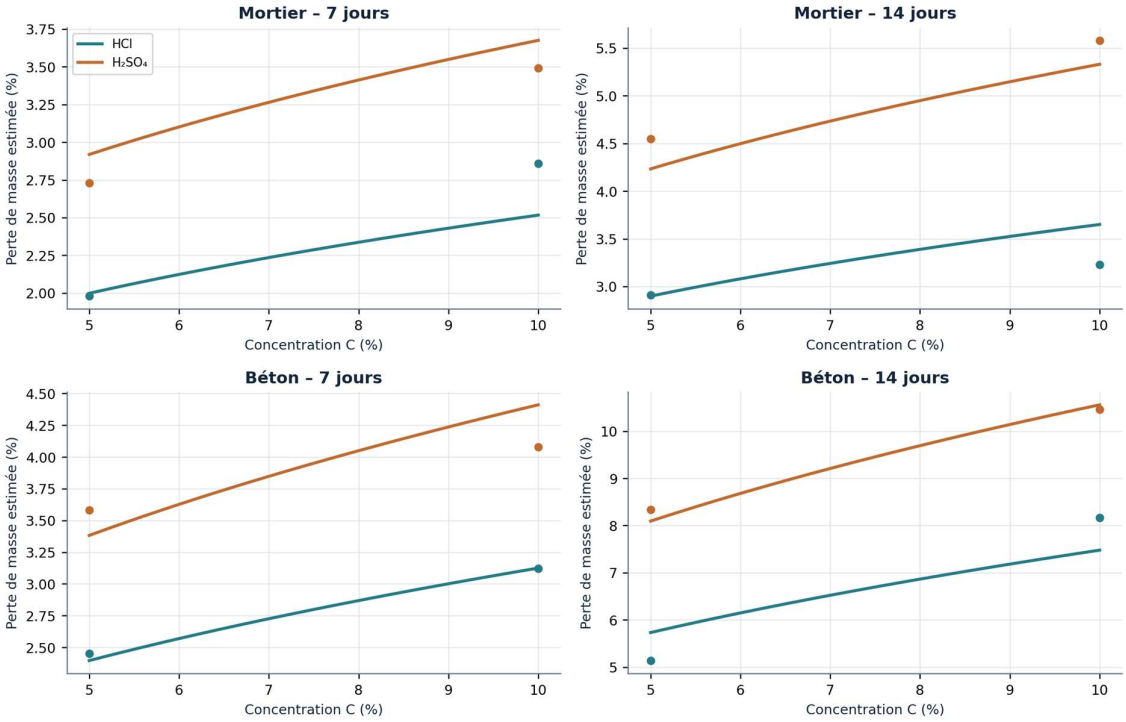


Figure 4. Simulation de Pm en fonction de la concentration, par matériau, acide et durée. Courbes : équations empiriques ; points : observations expérimentales aux deux bornes de concentration.

Les quatre panneaux montrent une augmentation systématique de Pm calculée lorsque la concentration augmente, pour les deux acides et les deux échéances. Le niveau calculé sous H_2SO_4 dépasse celui sous HCl à concentration et durée égales, conformément aux coefficients α positifs. Les courbes représentent les effets principaux continus postulés par la loi de puissance, non la découverte expérimentale de valeurs à toutes les concentrations intermédiaires.

International Journal of Progressive Sciences and Technologies (IJPSAT)
ISSN: 2509-0119.
© 2026 Scholar AI LLC.
https://ijpsat.org/
Vol. 59 No. 2 October 2026, pp. 874-886

6.3. Scénarios de résistance à la compression

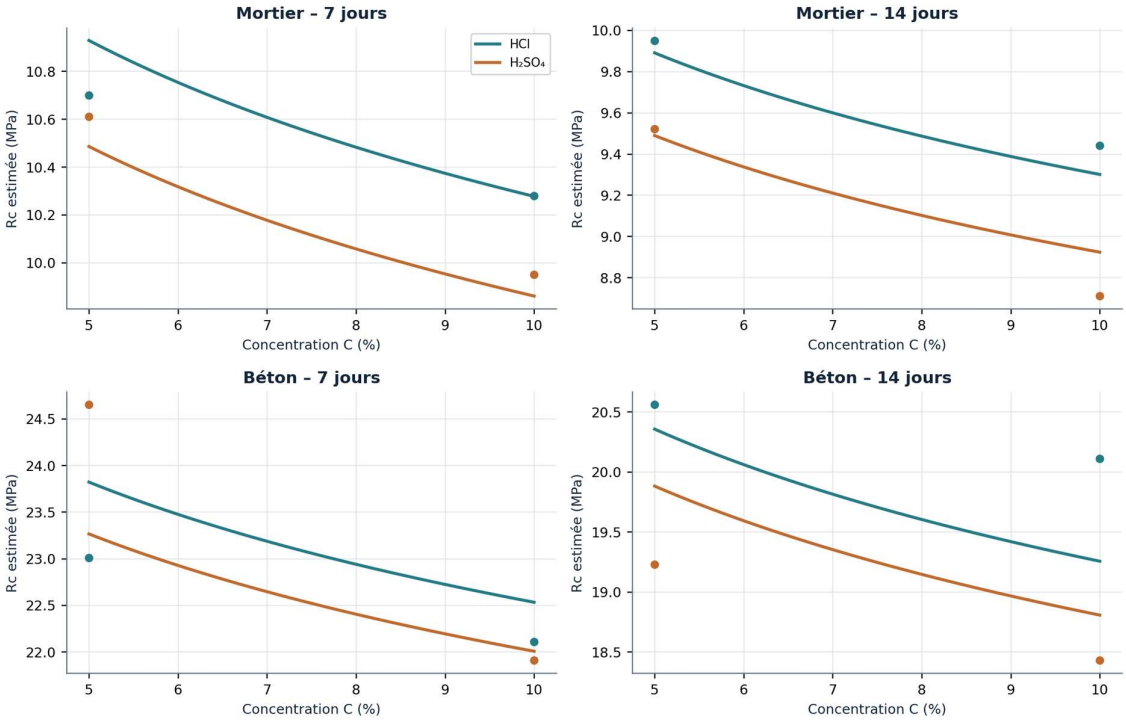


Figure 5. Simulation de Rc après immersion selon la concentration, pour les mortiers et bétons à 7 et 14 jours. Courbes : réponses ajustées ; symboles : mesures aux niveaux effectivement testés.

Les résistances calculées diminuent avec l'augmentation de C et entre 7 et 14 jours. Les pentes sont modérées sur un intervalle limité, mais leur direction est imposée par le signe négatif des exposants β et γ. Les écarts entre mesures et courbes demeurent visibles, en particulier pour certaines combinaisons du béton à 7 jours. Une simulation continue ne doit pas masquer la dispersion expérimentale observée.

International Journal of Progressive Sciences and Technologies (IJPSAT)
ISSN: 2509-0119.
© 2026 Scholar AI LLC.
https://ijpsat.org/
Vol. 59 No. 2 October 2026, pp. 874-886

6.4. Scénarios de retrait volumique et vigilance interprétative

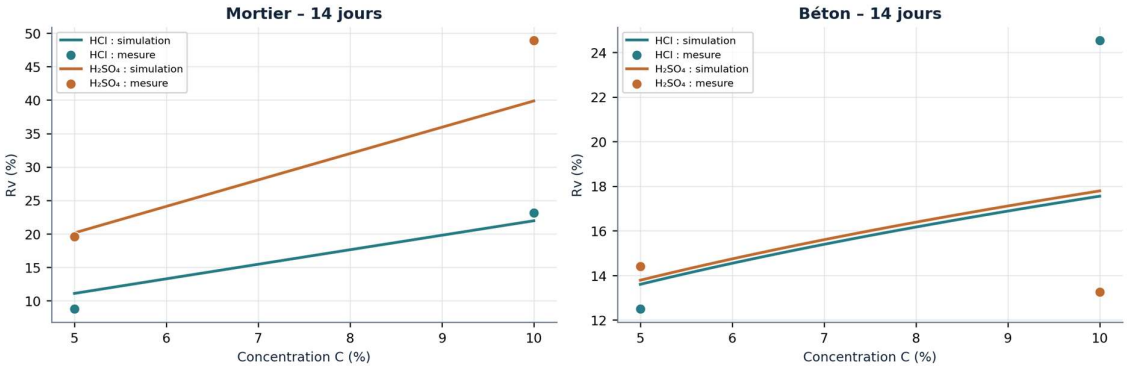


Figure 6. Simulation du retrait volumique à 14 jours en fonction de la concentration. Les écarts entre courbes et mesures montrent notamment les limites du modèle pour le béton.

La figure 6 permet de distinguer immédiatement une tendance moyenne imposée par l'équation et les fluctuations réellement observées. Pour le mortier, la progression du retrait calculé accompagne celle des données, avec néanmoins des écarts quantitatifs. Pour le béton, les mesures sous H_2SO_4 à 14 jours passent de 14,40 % à 13,25 % lorsque la concentration augmente, alors que la loi estimée prédit une augmentation : cette contradiction locale constitue une limite substantielle à toute utilisation décisionnelle de Rv calculé. Les simulations dimensionnelles doivent, à ce stade, rester exploratoires.

Tableau 5. Exemple de sorties simulées pour deux scénarios intermédiaires (non mesurés).

Matériau	Acide	C (%)	t (j)	Pm (%)	Rv (%)	Rc (MPa)
Mortier	HCl	7,5	10,5	2,84	10,24	9,94
Mortier	H_2SO_4	7,5	10,5	4,15	18,60	9,54
Béton	HCl	7,5	10,5	4,66	13,50	21,03
Béton	H_2SO_4	7,5	10,5	6,58	13,68	20,54

Le tableau 5 présente des exemples purement calculatoires pour C = 7,5 % et t = 10,5 jours : ces valeurs ont été choisies à l'intérieur du domaine étudié afin d'illustrer le fonctionnement des interfaces. Elles ne correspondent à aucune mesure et leur exactitude expérimentale n'a pas été évaluée. Elles ne doivent pas être utilisées pour dimensionner des ouvrages ou estimer leur durée de service.

7. DISCUSSION GÉNÉRALE, LIMITES ET PERSPECTIVES

La démarche met en évidence l'intérêt d'une analyse multi-indicateurs de la durabilité chimique. La perte de masse renseigne sur l'altération matérielle, le retrait sur la modification dimensionnelle et la résistance après immersion sur la performance mécanique à la condition expérimentale considérée. Les trois indicateurs montrent des niveaux d'ajustement distincts ; une bonne correspondance pour Pm ne signifie pas que Rv ou Rc puissent être déduits avec une précision équivalente.

Du point de vue méthodologique, le modèle retenu constitue un compromis entre parcimonie et lisibilité des paramètres. Les coefficients exponentiels permettent une lecture immédiate des effets conditionnels dans le domaine étudié et sont facilement transférables vers un tableur ou un outil de visualisation. Cependant, le choix des effets principaux interdit de représenter les inversions locales de tendance, particulièrement celles du retrait volumique des bétons. Une extension incluant des interactions ou

des approches mécanistiques ne serait justifiée qu'à partir d'un ensemble expérimental enrichi, idéalement avec répétitions et analyse d'incertitude.

La littérature souligne l'importance de la nature du système liant, de la composition des acides et des protocoles d'essai dans la durabilité des matériaux activés alcalinement [1], [4], [5]. Dans la présente étude, les équations restent spécifiques au mortier F7 et au béton BAL5. Le comportement des systèmes contenant de la chaux ne saurait être extrapolé directement à d'autres dosages en calcium ou à d'autres mélanges CBR/MK/CX. De même, le traitement des solutions à 5 et 10 % ne caractérise pas l'ensemble des milieux chimiques rencontrés en exploitation.

La valorisation de la CBR et du métakaolin dans ce programme offre une voie de développement de matériaux utilisant des matières premières disponibles localement, avec un intérêt supplémentaire lié à la production de silicate de sodium à base de CBR [6]. La contribution du présent article se distingue toutefois de l'évaluation expérimentale initiale : elle porte avant tout sur la mise en équations, l'évaluation critique des ajustements et la transformation des équations en outil d'analyse de scénarios. Toute reprise future des mêmes données dans plusieurs publications devra être signalée avec transparence aux éditeurs, conformément aux pratiques de publication scientifique.

La poursuite des travaux devrait privilégier des durées supérieures à 14 jours, plusieurs concentrations intermédiaires, des mesures répétées à chaque condition et des essais indépendants sur les mêmes formulations. Elle pourra intégrer des mesures microstructurales et chimiques afin de relier les variations de propriétés à des mécanismes d'altération ; les interactions entre paramètres et l'estimation d'intervalles d'incertitude constitueront ensuite des extensions pertinentes. À terme, une approche de validation sur des configurations en service serait nécessaire avant toute utilisation opérationnelle.

8. CONCLUSION

L'étude propose un cadre empirique de modélisation et de simulation de la durabilité chimique de deux formulations géopolymères élaborées à partir de cendre de balle de riz et de métakaolin : un mortier F7 et un béton BAL5. À partir de huit combinaisons d'exposition par matériau, six modèles multiplicatifs ont été identifiés pour la perte de masse, le retrait volumique et la résistance à la compression après immersion dans HCl ou H_2SO_4 à 5 ou 10 % pendant 7 ou 14 jours.

Les modèles présentent, sur les observations utilisées pour leur identification, des R^2 compris entre 0,9372 et 0,9526 pour les mortiers et entre 0,5269 et 0,9826 pour les bétons. La perte de masse est globalement bien ajustée et la résistance mécanique suit une tendance décroissante dans les simulations. Le retrait volumique du béton reste le principal point de fragilité de la représentation : les résultats corrigés à 14 jours révèlent des évolutions non monotones que la loi sans interactions ne restitue pas correctement.

L'intégration des équations dans des interfaces Excel et Python/Streamlit rend possible une exploration lisible des scénarios d'exposition à l'intérieur du domaine expérimental. Il s'agit d'un outil scientifique d'interprétation et non d'un modèle validé pour des extrapolations de durée de vie. Une augmentation de la densité expérimentale, l'introduction éventuelle d'interactions et une validation indépendante demeurent indispensables pour consolider sa portée prédictive.

RÉFÉRENCES

[1] Aiken, T. A., Gu, L., Kwasny, J., Huseien, G. F., McPolin, D., & Sha, W. (2022). Acid resistance of alkali-activated binders: A review of performance, mechanisms of deterioration and testing procedures. Construction and Building Materials, 342, 128057. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128057

[2] Bakharev, T. (2005). Resistance of geopolymer materials to acid attack. Cement and Concrete Research, 35(4), 658–670. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.06.005

[3] Provis, J. L. (2018). Alkali-activated materials. Cement and Concrete Research, 114, 40–48. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.02.009

[4] Kwasny, J., Aiken, T. A., Soutsos, M. N., McIntosh, J. A., & Cleland, D. J. (2018). Sulfate and acid resistance of lithomarge-based geopolymer mortars. Construction and Building Materials, 166, 537–553. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.129

[5] Lezzerini, M., Aquino, A., & Pagnotta, S. (2024). Acid resistance of metakaolin-based geopolymers and geopolymeric mortars reinforced with coconut fibers. Fibers, 12(5), 40. https://doi.org/10.3390/fib12050040

[6] Tchakouté, H. K., Rüscher, C. H., Kong, S., & Ranjbar, N. (2016). Synthesis of sodium waterglass from white rice husk ash as an activator to produce metakaolin-based geopolymer cements. Journal of Building Engineering, 6, 252–261. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2016.04.007

[7] Khan, H. A., Castel, A., & Khan, M. S. H. (2020). Corrosion investigation of fly ash based geopolymer mortar in natural sewer environment and sulphuric acid solution. Corrosion Science, 168, 108586. https://doi.org/10.1016/j.corsci.2020.108586