

Optimisation des propriétés mécaniques et de l'impact environnemental de matériaux à base de terre crue stabilisée par un liant géopolymère pour des applications en travaux publics.

Younes FAREZ

CY Cergy Paris Université, Laboratoire de Mécanique et Matériaux du Génie Civil, EA4114, F-95000 Cergy-Pontoise, France

RESUME

Ce travail vise à développer de nouveaux matériaux à base de terre crue (TC) stabilisée au moyen d'un liant géopolymère pour des applications en travaux publics telles que les bordures. Le liant utilisé est à base de métakaolin (MK) et d'une solution alcaline composée de silicate de sodium et de l'hydroxyde de sodium. Afin d'optimiser les formulations vis-à-vis des résistances mécaniques attendues, un plan d'expériences de second degré de type matrice composite a été élaboré en variant trois rapports molaires : $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ (X) de 3 à 4 ; $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ (Y) de 0.9 à 1.1 et $\text{H}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ (Z) de 20 à 26. Quinze formulations ont été élaborées afin d'établir un modèle mathématique de second ordre reliant les résistances mécaniques aux paramètres d'entrée X, Y, et Z. Dans une première approche, le rapport massique métakaolin/terre crue (MK/TC) a été fixé à 0.33. Des éprouvettes prismatiques sont fabriquées et les propriétés physicochimiques et mécaniques sont déterminées. Les premières analyses ont montré que les formulations de rapport molaire $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ (X) élevé présentent de meilleures résistances mécaniques contrairement aux formulations de rapports $\text{H}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ (Z) et $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ (Y) élevés. Les résistances optimales en compression (22.5 MPa) et en flexion (4.5 MPa) sont obtenues pour le triplet (X=3.8, Y=0.9 et Z=20). A la suite de la validation du modèle mathématique, statistiquement et expérimentalement, le rapport massique MK/TC a été varié de 0.33 à 0.16 afin d'évaluer l'impact environnemental du liant.

Mots-clefs Terre crue, stabilisation, géopolymère, optimisation, ACV.

I. INTRODUCTION

Chaque année en France des millions de tonnes de terre sont excavées sur les chantiers de construction. Rien que le projet du Grand Paris Express qui concerne l'extension du réseau de transport francilien sur plus de 200 km, va générer selon les estimations plus de 45 millions de tonnes de terres excavées d'ici 2030. Face à ces quantités très importantes posant des problèmes de stockage et de traitement, les autorités françaises ont imposé la nécessité de les valoriser. Les terres d'excavation sont souvent valorisées dans des applications telles que les briques en terre comprimée (BTC) ou l'adobe (Shaaban, 2021), mais rarement dans le secteur des travaux publics, notamment dans des applications telles que les bordures et les glissières de sécurité. L'utilisation de la terre crue nécessite souvent une stabilisation chimique afin de remédier aux problèmes de durabilité tels que le retrait de séchage, les cycles d'humidification-séchage et de gel/dégel (Barman and Dash, 2022). Cette stabilisation chimique est réalisée par l'ajout d'un liant organique ou minéral tel que le ciment portland, la chaux ou le bitume. Toutefois, ces liants ont un impact

environnemental très élevé, ce qui peut compromettre leur utilisation. Actuellement, le liant "géopolymère", qui est un polymère inorganique développé par Davidovits en 1976 (Davidovits, 2005) est considéré parmi les liants les plus prometteurs pour répondre aux enjeux environnementaux. Ce dernier est formé par la réaction entre une source aluminosilicate amorphe telle que le métakaolin et un activateur alcalin tel que le silicate de sodium (Duxson et al., 2007), ce processus crée une structure tridimensionnelle stable, offrant des propriétés mécaniques (résistances à la compression et à la flexion) similaires à celles obtenues en utilisant des ciments traditionnels, tout en présentant des avantages environnementaux significatifs. Pourtant, son utilisation pour la stabilisation de la terre crue est encore peu étudiée dans la littérature. L'objectif de cet article est d'étudier la viabilité de l'utilisation d'un liant géopolymère à base de métakaolin, pour valoriser la terre crue dans des applications telles que les bordures. Dans un premier temps, une optimisation du liant dans la matrice terre-géopolymère a été réalisée à l'aide d'un plan d'expériences de second degré à trois facteurs ($\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ (X); $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ (Y); $\text{H}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ (Z)). Ensuite le rapport massique métakaolin/terre crue (MK/TC) a été optimisé afin de réduire l'impact environnemental des différentes formulations, une analyse de cycle a été réalisée pour évaluer la viabilité écologique des différentes formulations ainsi que la contribution de chaque constituant des mélanges.

II. MATERIAUX ET METHODES

A. Matériaux utilisés

La terre crue (TC) utilisée dans cette étude est issue de la société Extract Ecoterres spécialisée dans le traitement et la valorisation des terres d'excavation et des sédiments de dragage. Les résultats de l'analyse granulométrique montrent que le sol est composé de 12 % de graviers (>4mm), 14 % de sable grossier (2-4 mm), 61% de sable fin (0.63-2 mm), et 13% de particules fines (<63 μm). L'analyse par Diffraction aux Rayons X du sol révèle la présence du quartz (SiO_2) comme minéral principal, des feldspath (microcline, albite et l'orthoclase) et des traces d'argiles (kaolinite et illite). Le Métakaolin (MK) utilisé provient de la calcination flash des carrières de Fumel par Argeco. Le tableau 1 résume les compositions chimiques des matériaux obtenues par XRF. La solution alcaline utilisée pour l'activation du métakaolin est composée d'une solution de silicate de sodium ajustée par de l'hydroxyde de sodium en pastilles et de l'eau distillée. La solution de silicate de sodium fournie par l'entreprise Fisher, est caractérisée par un rapport molaire $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ de 2.1, une partie sèche de 38.3 % et une densité de 1.5. L'hydroxyde de sodium utilisé est fourni par l'entreprise SIGMA d'une pureté supérieure à 98 %.

Tableau 1 : Composition chimique des matériaux.

Oxydes wt (%)	SiO_2	Al_2O_3	CaO	MgO	Fe_2O_3	Na_2O	K_2O	TiO_2	PAF
Matériaux									
Métakaolin (MK)	67.10	26.80	1.12	0.11	2.56	0.01	0.12	1.37	<1
Terre crue (TC)	79.80	5.70	2.62	0.32	3.47	0.17	0.87	0.87	5.4

B. Méthodologie et formulations

Dans un premier temps, le liant géopolymère a été optimisé dans la matrice terre-géopolymère en utilisant un plan d'expériences sur des échantillons prismatiques de dimensions $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$. Le rapport massique MK/TC a été fixé à 0.33, pour assurer une bonne ouvrabilité des mélanges, particulièrement ceux fabriqués avec un rapport molaire Z($\text{H}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$) bas. Tandis que les trois

rappports molaires du système ($\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ (X) ; $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ (Y) ; $\text{H}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ (Z)) sont variés. Ensuite, nous avons procédé à l'optimisation du rapport MK/TC en utilisant l'algorithme présenté dans la section B.2. Tous les échantillons fabriqués ont été démoulés après 48 h et conservés dans des conditions contrôlées à une température de 20 ± 3 °C et une humidité relative supérieure à 80%. Les résistances à la compression et à la flexion sont déterminées suivant la norme NF-EN 196-1.

B.1 Optimisation du liant par un plan d'expériences

Afin d'optimiser le liant géopolymère dans la matrice terre-géopolymère, un plan d'expériences de second degré de type matrice composite centrée à trois facteurs a été élaboré à l'aide du logiciel AZURAD (Azurad). Les facteurs d'entrée du modèle sont les rapports molaires $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ (X), $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ (Y) et $\text{H}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ (Z). Chaque facteur a été réglé sur trois niveaux [bas (-1), centre (0) et haut (+1)] comme indiqué dans le tableau 2. Les limites inférieures et supérieures choisies pour chaque facteur ont été établies en se basant sur des résultats de la littérature (Juengsuwattananon et al., 2019) et en prenant en compte l'ouvrabilité des mélanges. Au total, dix-sept formulations ont été élaborées comme indiqué dans le tableau 3 (quinze pour le plan d'expériences, et deux pour la validation des modèles prédictifs). L'objectif principal de ce plan d'expériences est d'identifier l'influence de chaque facteur et de leur interaction sur les réponses du système, qui sont dans notre cas, les résistances à la compression et à la flexion. De plus, un modèle quadratique a été développé pour modéliser les réponses du système en fonction de chaque facteur et de leurs interactions en tout point du domaine expérimental, avec le polynôme quadratique suivant :

$$R = b_0 + b_1 X + b_2 Y + b_3 Z + b_{12} XY + b_{13} XZ + b_{23} YZ + b_{11} X^2 + b_{22} Y^2 + b_{33} Z^2 + \varepsilon$$

Où :

- b_0 : moyenne au centre du domaine
- $b_i(1,2,3)$: effets des paramètres (X, Y,Z)
- $b_{ij}(12,23,13)$: effets des interactions (XY,YZ,XZ)
- $b_{ii}(11,22,33)$: coefficients des termes quadratiques (X^2, Y^2, Z^2) ; ε : l'erreur

Tableau 2 : Les facteurs d'expériences et leur niveau.

Facteurs	Symbole	Niveau des facteurs		
		Bas (-1)	Centre (0)	Haut (+1)
X($\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$)	X	3	3.5	4
Y($\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$)	Y	0.9	1	1.1
Z($\text{H}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$)	Z	20	23	26

Tableau 3 : Formulations du plan d'expériences.

Expériences	X($\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$)	Y($\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$)	Z($\text{H}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$)	$\frac{m_{MK}}{m_{TC}}$
F1	3	0.9	20	0.33
F2	4	0.9	20	0.33
F3	3	1.1	20	0.33
F4	4	1.1	20	0.33
F5	3	0.9	26	0.33
F6	4	0.9	26	0.33

F7	3	1.1	26	0.33
F8	4	1.1	26	0.33
F9	3	1	23	0.33
F10	4	1	23	0.33
F11	3.5	0.9	23	0.33
F12	3.5	1.1	23	0.33
F13	3.5	1	20	0.33
F14	3.5	1	26	0.33
F15	3.5	1	23	0.33
F16	3.8	0.931	20.501	0.33
F17	3.6	0.91	21.07	0.33

B.2 Optimisation de la quantité du liant

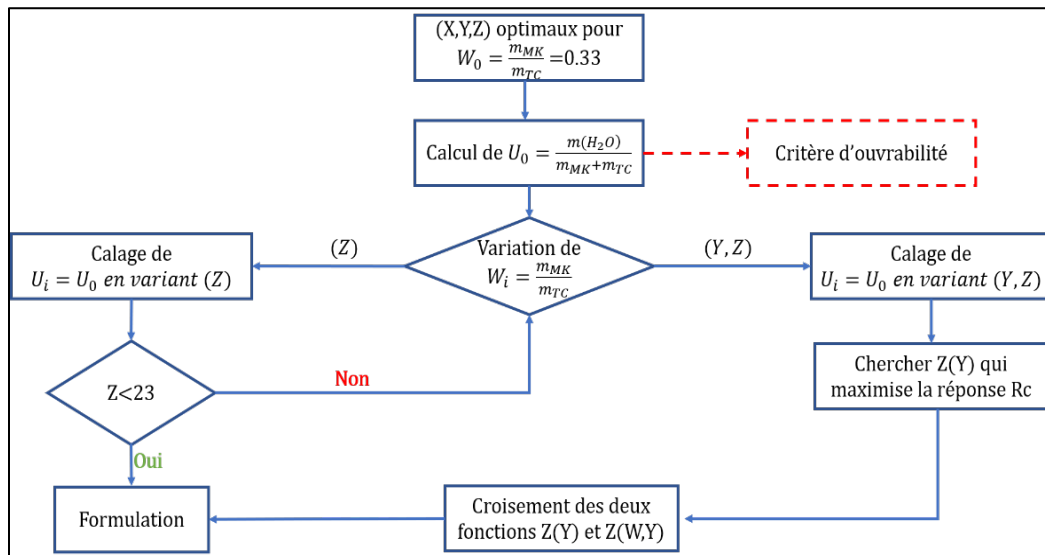


Figure 1 : Algorithme d’optimisation du rapport MK/TC.

Afin de minimiser l’impact environnemental du liant, la méthode décrite dans l’algorithme présenté dans la figure 1 a été suivie. Cette méthode consiste à fixer le rapport massique eau/ (terre + métakaolin) ($U_0 = E / (TC + MK)$), puis à faire varier le rapport massique ($W_i = MK / TC$) en diminuant la quantité du métakaolin. A chaque variation de ce rapport, un ajustement du rapport $U_i = U_0$ est effectué en modifiant les deux rapports molaires $Y (Na_2O) / Al_2O_3$ et $Z (H_2O / Na_2O)$. Au total, quatre formulations, désignées par W_0, W_1, W_2 et W_3 , ont été respectivement élaborées avec des rapports massiques $W_i = MK / TC$ de 33%, 26%, 21% et 16%. Les quatre formulations ont le même rapport molaire $X (SiO_2 / Al_2O_3)$ de 3.8 issu de l’optimisation par plan d’expériences. Le tableau 4 récapitule les différentes formulations élaborées, mettant en évidence les rapports massiques $W_i = MK / TC$ ainsi que les rapports molaires X, Y et Z correspondants. Des essais de résistance à la compression et à la flexion, ont été effectués à 7 et 28 jours. Par la suite, l’impact environnemental des quatre formulations a été évalué.

Tableau 4 : Formulations d'optimisation de W_i .

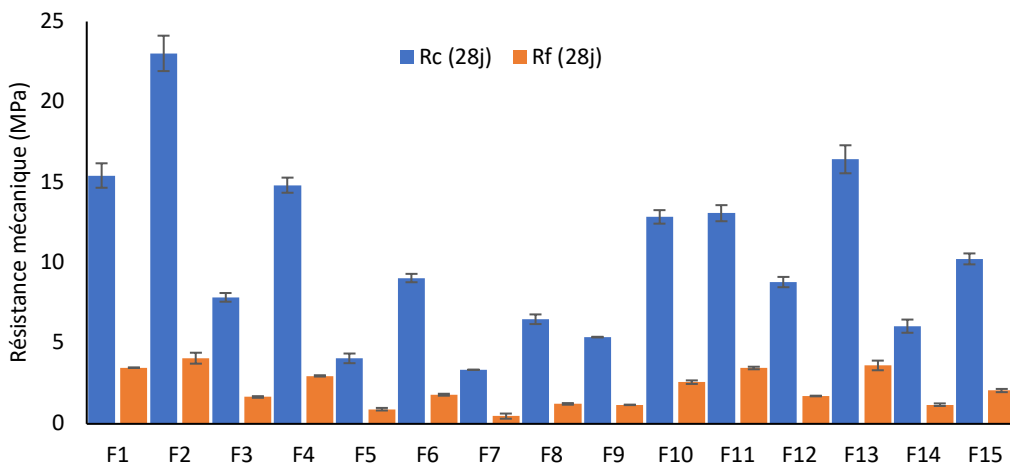
Formulations	Rapport molaire			Rapport massique	
	SiO_2/Al_2O_3	Na_2O/Al_2O_3	H_2O/Na_2O	$W_i = \frac{m_{MK}}{m_{TC}}$	$\frac{m(H_2O)}{m_{MK} + m_{TC}}$
W₀	3.8	0.931	20.501	0.333	0.226
W₁	3.8	1.025	22.557	0.26	0.226
W₂	3.8	1.118	24.596	0.21	0.226
W₃	3.8	1.254	27.590	0.16	0.226

III. RESULTAS ET DISCUSSIONS

A. Optimisation du liant géopolymère

A.1 Résistances à la compression et à la flexion

La figure 2 résume les résistances à la compression et à la flexion obtenues à 28 jours pour les quinze formulations du plan d'expériences. Les valeurs de la résistance à la compression varient entre 3.4 et 23.0 MPa, tandis que celles de la résistance à flexion varient entre 0.5 et 4.1 MPa. Les résistances mécaniques maximales sont obtenues avec la formulation numéro F2, qui est élaborée avec les rapports molaires $X(SiO_2/Al_2O_3)$ de 4, YNa_2O/Al_2O_3 de 0.9 et $Z(H_2O/Na_2O)$ de 20. L'effet de chaque rapport molaire sur les résistances mécaniques est discuté dans la section A.3.

**Figure 2 : Résistances à la compression et à la flexion des formulations.**

A.2 Validation des modèles de prédiction

Une analyse statistique a été réalisée afin de valider les modèles quadratiques qui décrivent les résistances à la compression et à la flexion en fonction des rapports molaires $[X(SiO_2/Al_2O_3)$,

$Y(\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3)$ et $Z(\text{H}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O})$]. Le tableau 5 présente les valeurs du coefficient de détermination R^2 , du R^2 ajusté et de la valeur de probabilité (valeur-p) des deux modèles.

Tableau 5 : Données statistiques des modèles prédictifs.

Données statistiques	Degré de liberté	R^2	R^2A	Valeur-p
Modèle de la résistance en compression (R_c)	5	0.995	0.987	0.0004 (<0.05)
Modèle de la résistance en flexion (R_f)	5	0.979	0.941	0.0011 (<0.05)
$R_c = 10,36 + 3,01X - 2,33 Y - 4,85Z - 0,308XY - 0,8XZ + 1,56YZ - 1,26 X^2 + 0,56 Y^2 + 0,86 Z^2$ (MPa)				
$R_f = 2,16 + 0,51X - 0,50Y - 1,04 Z + 0,04XY - 0,05 XZ + 0,263 YZ - 0,29 X^2 + 0,02 Y^2 + 0,22 Z^2$ (MPa)				

Les modèles se révèlent robustes avec des coefficients de détermination élevés, atteignant 0.995 pour la résistance à la compression et 0.979 pour la résistance à la flexion. Les valeurs-p des modèles, respectivement de 0.0004 et 0.0011 pour la résistance à la compression et à la flexion, sont inférieures à 0.05, ce qui confirme la significativité statistique des modèles quadratiques. Ainsi, ces modèles sont considérés comme ajustés et fiables. En complément de la validation statistique des modèles prédictifs, une validation expérimentale a été réalisée. Deux formulations ont été sélectionnées de manière aléatoire à l'intérieur du domaine expérimental. Les deux modèles ont ensuite été appliqués aux formulations choisies pour évaluer leur performance et leur capacité à prédire les résistances mécaniques. La comparaison entre les résultats expérimentaux et les prédictions des modèles, a confirmé leur efficacité et leur précision, avec des erreurs de prédictions comprises entre 1.26 % à 4.9 % comme indiqué dans le tableau 6.

Tableau 6 : Validation des modèles mathématiques.

Formulation	Rapport molaire			Résistance à la compression à 28 jours (MPa)			Résistance à la flexion à 28 jours (MPa)		
	X ($\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$)	Y ($\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$)	Z ($\text{H}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$)	V.p	V.m	Différence %	V.p	V.m	Différence %
F16 (test 1)	3.8	0.931	20.501	19.66	20.00 ± 0.48	+1.7	3.90	3.95 ± 0.19	+1.26
F17 (test 2)	3.6	0.91	21.07	18.08	19.03 ± 0.67	+4.9	3.63	3.78 ± 0.27	+3.96
V.m : Valeur mesurée V.p : Valeur prédite									

A.3 Discussion sur l'évolution des résistances mécaniques en fonctions des rapports molaires

- Effet du rapport molaire ($\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$)

L'augmentation du rapport molaire $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ (X) de 3 à 4 a un effet favorable sur les résistances mécaniques. Pour des rapports molaires $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ (Y=0.9) et $\text{H}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ (Z=20) l'augmentation du rapport X($\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$) de 3 à 4 améliore respectivement de 50 % et 17 % la résistance à la compression et la résistance à la flexion. Les valeurs des coefficients b_1 qui traduisent l'effet de ce rapport molaire, obtenues après une analyse statique des résultats s'élèvent à 3.016 pour la résistance à la compression et 0.515 pour la résistance à la flexion. Cet effet favorable sur les

résistances mécaniques s’explique par l’augmentation des espèces [Si], qui favorise la réaction de géopolymérisation et la formation d’un gel N-A-S-H plus dense (Alumino-Silicates de Sodium Hydraté) (Duxson et al., 2007). Les valeurs négatives du coefficient b_{22} du terme quadratique X^2 , indiquent l’existence d’un optimum pour le rapport molaire SiO_2/Al_2O_3 , qui se situe entre 3.7 et 3.8, Cet optimum est mis en évidence par les surfaces de réponse de la résistance à la flexion $R=f(X, Z, Y=0.9)$ et $R=f(X, Y, Z=20)$ (figure 3).

▪ Effet du rapport molaire (Na_2O/Al_2O_3)

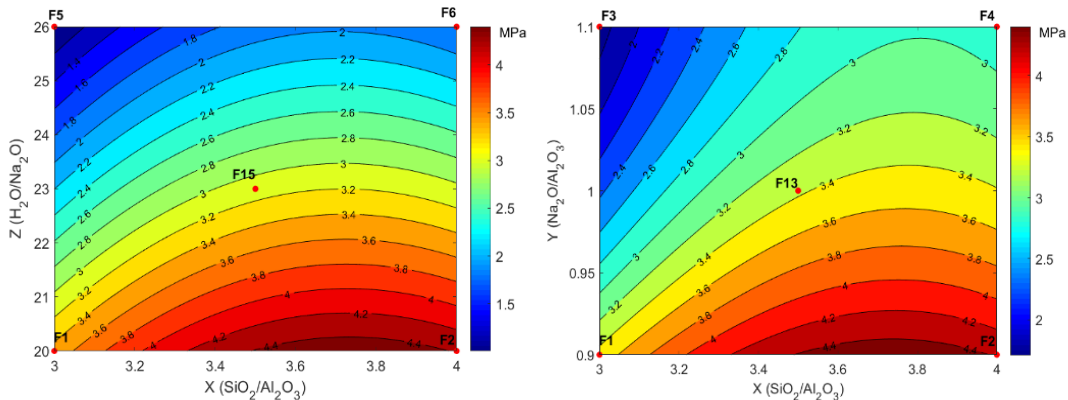


Figure 3 Surfaces de réponses de la résistance à la flexion, illustrant les effets des rapport molaires (X, Z) quand $Y=0.9$ (gauche) et (X, Y) quand $Z=20$ (droite)

Dans notre plan d’expériences, l’augmentation du rapport molaire Na_2O/Al_2O_3 (Y) de 0.9 à 1.1 entraîne une diminution des résistances mécaniques. Pour des rapports molaires SiO_2/Al_2O_3 ($X=4$) et H_2O/Na_2O ($Z=20$), cette augmentation réduit respectivement de 35.6% et 26.8 % la résistance à la compression et la résistance à la flexion. Cet effet négatif est aussi traduit par les coefficients b_2 (-2.33 et -0.505) du tableau 7. En effet, un excès en Na_2O par rapport à Al_2O_3 peut prématurer la précipitation du gel aluminosilicate, ce qui entraîne une diminution des propriétés mécaniques du géopolymère (Juengsuwattananon et al., 2019).

Tableau 7 : Effets des rapports molaires sur les résistances à la compression et à la flexion.

Terme	Coefficient	Valeur (Rc)	Effet (Rc)	Valeur (Rf)	Effet (Rf)
Moyenne au centre	b_0	10.361	-	2.16	-
$X(SiO_2/Al_2O_3)$	b_1	3.016	Positif	0.515	Positif
$Y(Na_2O/Al_2O_3)$	b_2	-2.331	Négatif	-0.505	Négatif
$Z(H_2O/Na_2O)$	b_3	-4.852	Négatif	-1.04	Négatif
XY	b_{12}	-0.308	N-S*	0.0493	N-S*
XZ	b_{13}	-0.803	N-S*	-0.053	N-S*
YZ	b_{23}	1.561	Positif	0.263	Positif
X^2	b_{11}	-1.264	E-Opti*	-0.298	E-Opti
Y^2	b_{22}	0.560	N-S*	0.021	N-S*
Z^2	b_{33}	0.865	N-S*	0.226	N-S*
N-S : Non significatif (valeur-p > 0.05) / E-Opti : Existence d’un optimum					

▪ Effet du rapport molaire (H_2O/Na_2O)

Dans cette étude, le rapport molaire $\text{H}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ a été varié de 20 à 26 afin d'évaluer son influence sur l'ouvrabilité et les résistances mécaniques. L'augmentation de ce rapport molaire permet d'améliorer l'ouvrabilité de notre matériau en réduisant la viscosité de la solution alcaline. Cependant, cette amélioration de l'ouvrabilité s'accompagne d'une réduction drastique des performances mécaniques, comme en témoignent les coefficients b_3 de -4.85 et -1.04 (Tableau 7). Cette baisse des résistances mécaniques s'explique principalement par l'augmentation de la porosité et la réduction de la densité du matériau. Le rapport molaire $\text{H}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ (Z) est étroitement lié à la quantité d'eau présente dans le système. Cette eau joue un rôle crucial dans le processus de dissolution des espèces Si-Al, mais ne participe pas au processus de polymérisation du géopolymère (Yusuf et al., 2014).

B. Optimisation du rapport massique métakaolin/terre-crue ($W_i = \frac{m_{MK}}{m_{TC}}$)

La figure 4 illustre l'évolution de la résistance à la compression à 7 et 28 jours, en fonction du rapport ($W_i = \text{MK}/\text{TC}$). En prenant $W_0 = 0.33$ comme formulation de référence, la résistance à la compression à 28 jours diminue de 24.4% pour W_1 , 31.5% pour W_2 et 66.5% pour W_3 . La baisse importante de la résistance à la compression de la formulation W_3 par rapport à W_0 s'explique d'une part, par le rapport molaire $\text{H}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ très élevé (27.59), ne favorisant pas la formation d'un gel géopolymère performant. Et d'autre part, par la réduction du volume de la pâte géopolymère. L'augmentation de la valeur du rapport molaire $\text{H}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ est conséquente à la quantité d'eau utilisée pour maintenir le rapport (eau / (terre + métakaolin)) constant à 0.226 (tableau 4), afin d'avoir une maniabilité acceptable du mélange terre-géopolymère. Par conséquent, il sera nécessaire d'utiliser des adjuvants tels que les superplastifiants pour les formulations dont le rapport ($W_i = \text{MK}/\text{TC}$) est inférieur à 21%, afin de réduire la quantité d'eau et ainsi, la valeur du rapport molaire $\text{H}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$.

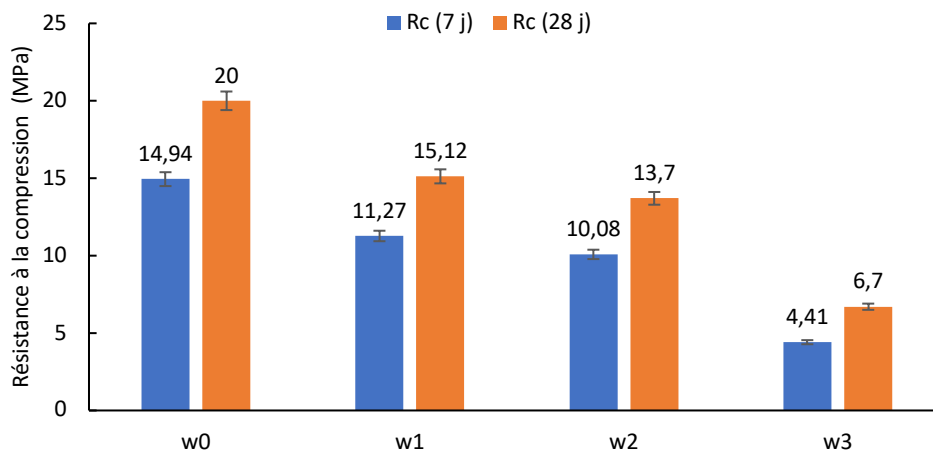


Figure 4 Résistance à la compression à 7 et 28 jours des formulations W_i

C. Analyse du cycle de vie des formulations W_i

L'objectif de cette partie de l'étude est de déterminer les impacts environnementaux des quatre formulations W_0 , W_1 , W_2 et W_3 . L'unité fonctionnelle choisie pour cette étude est la fabrication d'1 m^3 de terre crue stabilisée par un liant géopolymère (GPTC). Les limites du système étudié sont la production et le transport du métakaolin flash d'Argesco et des activateurs alcalins, ainsi que le transport et le tamisage de la terre crue (figure 5). L'analyse du cycle de vie des quatre formulations a été réalisée selon la norme ISO 14040, puis modélisée avec le logiciel openLCA en utilisant les

bases de données Ecoinvent v3.9. Le transport des matériaux est modélisé en utilisant la donnée « transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO6 ». La distance totale parcourue par l'ensemble des matériaux s'élève à 930 km. L'énergie nécessaire pour le tamisage d'une tonne de terre crue est de 1,08 kWh, tandis que le malaxage d'un mètre cube de matériaux requiert 7,09 kWh (Glanz et al., 2023). Les calculs des impacts environnementaux ont été réalisés selon la méthode CML v4.8 2016. Seuls les bilans carbonés sont présentés dans cette partie. La figure 6 présente les résultats de l'analyse du cycle de vie obtenus pour l'indicateur de changement climatique (GPW 100), avec la

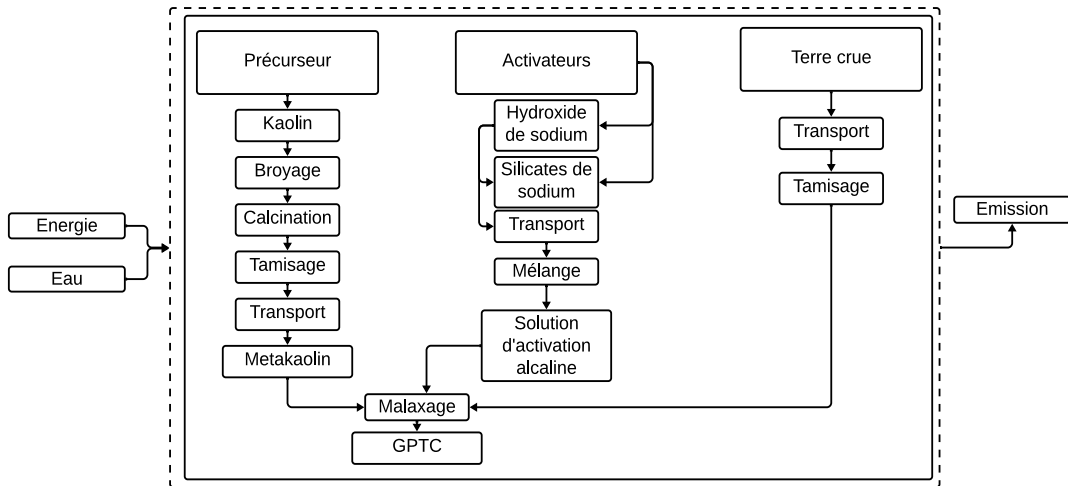


Figure 5 : Limites du système étudié.

contribution de chaque flux pour chaque formulation. L'empreinte carbone des formulations W₀, W₁, W₂ et W₃ est respectivement de 170.6, 148.1, 131.3 et 112.2 kg_{éq}CO₂/m³. On note une baisse comprise entre 32% et 55%, en comparaison à l'empreinte carbone d'un béton ordinaire de classe de résistance (C25/30). Le silicate de sodium se révèle être le principal contributeur au bilan carbone, avec des taux de contribution compris entre 40.2% et 46.3%. Le métakaolin, quant à lui, a une contribution comprise entre 26.6% et 30.6%. Le transport contribue également d'une manière significative avec des taux compris entre 19.6% et 20.3%. Afin de réduire l'impact environnemental des formulations, une utilisation d'activateurs alcalins plus écologiques est nécessaire, en recourant à de nouveaux processus de fabrication moins énergivores. En raison du bon compromis entre les performances mécaniques et environnementales, la formulation W₃ est retenue pour la fabrication de 30 ml de bordures de type P1 (500×200×80 mm³) dans le cadre d'un projet expérimental mené par l'entreprise Vinci construction en vue d'une mise en situation réelle.

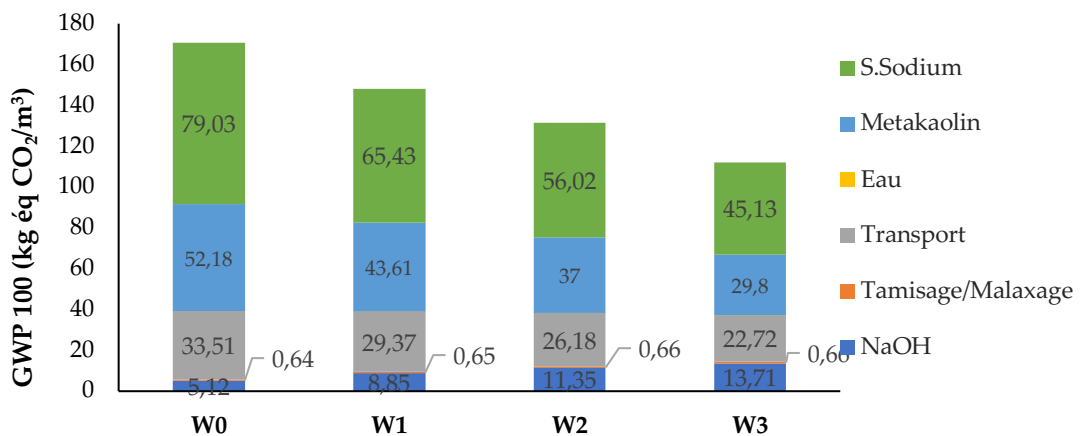


Figure 6 : Bilan carbone des formulations W_i.

IV. CONCLUSION

Cette étude a pour objectif d'analyser l'efficacité de la stabilisation de la terre crue à l'aide d'un liant géopolymère à base de métakaolin. Différents rapports molaires ont été étudiés. L'optimisation du liant dans la matrice terre-géopolymère, réalisée à l'aide d'un plan d'expériences de second degré, a démontré que l'augmentation du rapport molaire $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ améliore les performances mécaniques du matériau, avec l'existence d'un optimum à $X=3.8$ obtenu dans le cadre de cette étude. En revanche, l'augmentation des rapports molaires $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ et $\text{H}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ présente un effet défavorable sur les résistances mécaniques en raison de la quantité d'eau élevée présente dans le système. De plus, deux modèles prédictifs des résistances mécaniques ont été développés puis validés statistiquement et expérimentalement. L'optimisation du rapport massique métakaolin/terre-crue ($W_i = \text{MK}/\text{TC}$) a démontré qu'en deçà de 21%, les résistances mécaniques diminuent drastiquement en raison du rapport molaire $\text{H}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ élevé, qui ne favorise pas la formation d'un gel géopolymère (N-A-S-H) performant. Enfin, une analyse du cycle de vie est réalisée pour les différentes formulations. Les résultats de cette dernière démontrent que le silicate de sodium est le plus grand contributeur au bilan carbone. Comparativement à l'empreinte carbone d'un béton ordinaire de classe de résistance (C25/30), nous observons une baisse de l'ordre de 55% des émissions de CO_2 , bien que les résistances ne soient pas équivalentes. Des études de durabilité, notamment la résistance aux cycles gel/dégel et humidification/séchage et le retrait de séchage sont en cours. Il est prévu d'exploiter les résultats obtenus à une échelle industrielle pour une utilisation dans la conception de bordures de type P1 ($500 \times 200 \times 80 \text{ mm}^3$).

REFERENCES

- Azurad.fr - Logiciel de plans d'expériences [WWW Document], n.d. URL <http://www.azurad.fr/logiciel-plans-experiences.php> (accessed 4.28.24).
- Barman, D., Dash, S.K., 2022. Stabilization of expansive soils using chemical additives: A review. *J. Rock Mech. Geotech. Eng.* 14, 1319–1342. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2022.02.011>
- Davidovits, J., 2005. Geopolymer, Green Chemistry and Sustainable Development Solutions: Proceedings of the World Congress Geopolymer 2005. Geopolymer Institute.
- 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. *J. Mater. Sci.* 42, 2917–2933. <https://doi.org/10.1007/s10853-006-0637-z>
- Glanz, D., Sameer, H., Göbel, D., Wetzels, A., Middendorf, B., Mostert, C., Bringezu, S., 2023. Comparative environmental footprint analysis of ultra-high-performance concrete using Portland cement and alkali-activated materials. *Front. Built Environ.* 9.
- Juengsuwattananon, K., Winnefeld, F., Chindapasirt, P., Pimraksa, K., 2019. Correlation between initial $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$, $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$, $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ and $\text{H}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ ratios on phase and microstructure of reaction products of metakaolin-rice husk ash geopolymer. *Constr. Build. Mater.* 226, 406–417. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.146>
- Shaaban, M., 2021. Sustainability of Excavation Soil and Red Brick Waste in Rammed Earth. *Civ. Eng. Archit.* 9, 789–798. <https://doi.org/10.13189/cea.2021.090320>
- Yusuf, M.O., Megat Johari, M.A., Ahmad, Z.A., Maslehuddin, M., 2014. Effects of $\text{H}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ molar ratio on the strength of alkaline activated ground blast furnace slag-ultrafine palm oil fuel ash based concrete. *Mater. Des.* 1980–2015 56, 158–164. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.09.078>