

Influence De La Source D'aluminosilicate Sur Le Comportement Mécanique D'un Béton Geopolymère (Cendre De Balle De Riz Vs Pouzzolane)

[The Effect Of The Aluminosilicate Source On The Mechanical Behaviour Of Geopolymer Concrete (Rice Husk Ash Vs Pozzolan)]

Fanilonirina RAMANANTSALAMA¹, Zolimboahangy RAKOTOMALALA^{1,3}, Rasoloniaina Antoine KOERA³, Dimbimalala Mavoniaina RATSARAHASINA², Hery Mikaela RATSIMBAZAFY^{1,2}

¹École Doctorale en Sciences et Techniques de l'Ingénierie et de l'Innovation, Équipe d'Accueil Doctorale Ingénierie des Matériaux et des Matières Premières

²Centre National des Recherches Industrielles et Technologiques, Département Matériaux et Génie Civil BP 6294, Antananarivo 101, Madagascar

³École Supérieure Polytechnique d'Antananarivo, Université d'Antananarivo, BP 1500, Antananarivo 101, Madagascar

Auteur correspondant : Fanilonirina RAMANANTSALAMA, faniloramanants@gmail.com



Résumé - Cette étude examine l'effet de la source d'aluminosilicate sur les performances d'un éco-béton géopolymère. L'objectif est de déterminer laquelle entre la cendre de balle de riz et de la pouzzolane apporte la quantité de silice la plus réactive, afin d'identifier le matériau le mieux adapté pour optimiser la matrice géopolymérique. La méthodologie repose sur la formulation des deux types de matériaux bien distincts. Pour comparer équitablement leur réactivité, un protocole rigoureux a été appliqué aux deux mélanges en faisant varier des paramètres clés. Après les phases de malaxage, de moulage et de démoulage, les éprouvettes ont subi une cure à l'air libre et dans l'eau. Les caractères mécaniques ont ensuite été évalués en laboratoire par des essais de rupture à l'aide d'une presse hydraulique. Les résultats expérimentaux ont révélé que pour la variation du rapport molaire, la pouzzolane a besoin plus de quantité d'hydroxyde de sodium contenant dans l'élément activatrice pour dissocier la silice que celle de la cendre de balle de riz, elle est à l'ordre de 2,63%. La variation de la quantité d'aluminosilicate est équilibré par la proportion en pourcentage de 11,5/8,5/10 de la pouzzolane /métakaolin/chaux, ce qui explique un rajout de plus de cette dernière pour la stabilité du matrice. Quant au mélange de la cendre de balle de riz/métakaolin/chaux, il existe déjà une combinaison presque équilibré. La quantité du silicate de soude est de 40% et l'eau de gâchage est de 30% pour les deux mélanges. La conservation à l'air libre rend plus efficace le mélange avec la cendre de balle de riz ; et à l'inverse, le mélange avec la pouzzolane est plus ou moins avantageux dans l'eau. Finalement, la cendre de balle de riz s'impose comme la source d'aluminosilicate la plus performante pour une résistance à la compression de 7,56MPa, sa silice amorphe favorisant une meilleure géopolymérisation.

Mots clés : matériaux, formulation, dissolution, restructuration, polycondensation, résistance, compression.

Abstract - This study examines the effect of the aluminosilicate source on the performance of a geopolymer eco-concrete. The aim is to determine whether rice husk ash or pozzolan provides the highest amount of reactive silica, in order to identify the most suitable

material for optimising the geopolymer matrix. The methodology is based on the formulation of two distinct types of material. To compare their reactivity fairly, a rigorous protocol was applied to both mixtures by varying key parameters. Following the mixing, moulding and demoulding stages, the test specimens were cured in the open air and in water. The mechanical properties were then assessed in the laboratory through tensile tests using a hydraulic press. The experimental results revealed that, for a given variation in the molar ratio, pozzolan requires a greater quantity of sodium hydroxide contained in the activator to dissociate the silica than rice husk ash does; this is in the order of 2.63 per cent. The variation in the quantity of aluminosilicate is balanced by the percentage ratio of 11.5/8.5/10 for pozzolan/metakaolin/lime, which explains the higher addition of the latter to ensure the stability of the matrix. As for the mixture of rice husk ash/metakaolin/lime, a nearly balanced combination already exists. The quantity of sodium silicate is 40 per cent and the mixing water is 30 per cent for both mixtures. Storage in the open air makes the mixture with rice husk ash more effective; conversely, the mixture with pozzolan is more or less advantageous when stored in water. Finally, rice husk ash stands out as the most effective source of aluminosilicate, yielding a compressive strength of 7.56 MPa, with its amorphous silica promoting better geopolymerisation.

Key words : materials, formulation, dissolution, restructuring, polycondensation, strength, compression.

I. INTRODUCTION

De nos jours, l'industrie de la construction rencontre un double défi majeur : satisfaire une demande croissante en infrastructures et aussi de réduire son impact environnemental. La fabrication du ciment Portland traditionnel, pilier de ce secteur, est en effet l'une des premières causes de la pollution au monde en raison de ses fortes émissions de dioxyde de carbone [1]. Dans ce contexte, la recherche de liants moins polluants est devenue une priorité. Les bétons géopolymères représentent, sur ce point, une rupture technologique majeure et une solution d'avenir particulièrement innovante. Pour concevoir ces éco-matériaux, la tendance actuelle s'oriente vers l'exploitation et la valorisation de matières premières disponibles localement. Cette démarche permet non seulement de renforcer le développement économique régional, mais aussi de réduire les coûts et la pollution liés au transport. La synthèse de ces bétons repose sur la réaction chimique entre un activateur alcalin, tel que le silicate de soude, et une source d'aluminosilicate riche en silice et en alumine [2]. L'objectif est d'obtenir des propriétés mécaniques optimales pour garantir des constructions à la fois résistantes et durables. Cependant, une question scientifique demeure : quelle ressource locale apporte la silice la plus réactive et s'avère la mieux adaptée pour formuler un béton géopolymère? C'est précisément à cette problématique que tente de répondre ce travail, intitulé : « *Influence de la source d'aluminosilicate sur le comportement mécanique d'un béton géopolymère (cendre de balle de riz vs Pouzzolane)* ». À travers une étude comparative, ce projet analyse le potentiel de ces deux ressources afin de proposer une alternative constructive et écologique.

II. MATERIELS ET METHODE

Afin d'approfondir la caractérisation du matériau, il est nécessaire de présenter les différentes matières premières entrant dans la formulation du béton géopolymère. Elles sont les suivantes:

- La cendre de balle de riz
- La pouzzolane
- Le kaolin
- La chaux
- La soude caustique
- Le sable
- Le gravillon
- L'eau

2.1. Matériels

Les différents équipements et matériels mobilisés pour la conduite des essais sont :

- Four métallique de calcination : pour calciner les balles de riz ;
- Four de laboratoire : pour effectuer un traitement thermique du kaolin et la pouzzolane ;
- Broyeur à boulet : pour réduire en poudre fine la pouzzolane et la cendre de balle de riz ;
- Tamis : pour éliminer les impuretés et ne retenir que les fractions fines ;
- Balance de précision : pour peser avec exactitude les quantités requises de chaque constituant ;
- Cuvette en plastique : utilisée comme récipient pour le pesage des matières premières ;
- Cuvette en aluminium : utilisée comme récipient de malaxage pour assurer un mélange homogène des constituants ;
- Malaxeur : pour assurer l'homogénéisation des matières premières lors de la préparation des mélanges ;
- Moule à béton : pour donner aux éprouvettes leur forme et leurs dimensions ;
- Pieds à coulisse : pour mesurer avec précision les dimensions des éprouvettes ;
- Table vibrante : pour compacter les éprouvettes et éliminer les bulles d'air ;
- Presse hydraulique : pour les essais de compression du béton.

2.2. Préparation des matières premières

La préparation constitue une étape préalable essentielle. Elle vise à assurer la qualité, l'homogénéité et la reproductibilité des mélanges réalisés au cours de l'étude.

2.2.1. La cendre de balle de riz (CBR)

L'objectif est l'obtention d'une cendre qui offre une forte teneur en silice amorphe, pour accroître la réactivité et de favoriser son utilisation. [3]

Premièrement, les balles de riz ont été soumises à une calcination à une température aux environ de 600 °C dans un incinérateur artisanal fabriqué à partir d'un fût métallique cylindrique.



Photo 1 : Incinérateur de balle de riz (fût métallique cylindrique)

Ensuite, l'étape de la cuisson est de remplir le fût avec la balle de riz, tout en réalisant une cavité dans sa partie inférieure pour faciliter l'allumage et de permettre la propagation du feu vers le haut. La combustion a été réalisée lentement afin d'assurer une calcination homogène et complète. À la fin de l'opération, la cendre obtenue présentait une coloration grise.



Photo 2 : Balle de riz calciné

Puis, les cendres obtenues ont été soumises à un broyage au broyeur à boulets et tamisée sur un tamis de 0,4 mm pour éliminer les éléments indésirables.



Photo 3 : Cendre de balle de riz après broyage et tamisage

2.2.2. La pouzzolane (PZ)

La pouzzolane a également été soumise à un traitement préalable. Sa calcination a été réalisée dans un four de laboratoire, permettant un contrôle plus précis des conditions thermiques. Cette opération visait à éliminer l'humidité résiduelle et à améliorer la réactivité du matériau.



Photo 4 : Calcination de la pouzzolane

Après, la pouzzolane a subi les mêmes étapes de préparation que la cendre de balle de riz, notamment le broyage et le tamisage. Ces opérations ont permis d'obtenir une poudre fine et homogène.



Photo 5 : Pouzzolane après broyage et tamisage

2.2.3. Le métakaolin (MK)

Compte tenu de sa finesse initiale, il a été tout de suite calciné pour obtenir du métakaolin. Les conditions de calcination sont similaires à celles de la pouzzolane naturelle.

2.2.4. La chaux (CX)

Le choix de la chaux BOUTSIKA repose sur sa richesse en composés calciques, susceptibles d'améliorer les réactions de géopolymérisation. Sa disponibilité locale constitue également des atouts pour son utilisation.

2.2.5. La soude caustique

L'hydroxyde de sodium (NaOH) est fourni par l'entreprise SPCI (Société de Produits Chimiques Industriels). Il intervient comme activateur alcalin dans la formulation du liant géopolymère. [4]

2.2.6. Le sable

Le sable retenu pour les essais est sec, propre et à faible granulométrie. Ces caractéristiques permettent d'assurer une bonne homogénéité du mélange.

2.2.7. Le gravillon

Le gravillon utilisé est de taille moyenne, sélectionné pour être adaptée aux dimensions des éprouvettes. Après tamisage, il présente une bonne propreté, garantissant l'élimination des particules fines et des impuretés.

2.2.8. L'eau

L'eau utilisée est fournie par la JIRAMA. Facilement accessible localement, elle constitue une ressource couramment employée dans les travaux de construction.

2.3. Méthode de fabrication du béton géopolymère

Cette étape consiste à la fabrication des éprouvettes. Elle nécessite une attention particulière et une exécution rigoureuse afin de garantir l'homogénéité des mélanges, la reproductibilité des résultats et la qualité des éprouvettes obtenues.

La figure suivante illustre l'enchaînement des différentes opérations mises en œuvre lors de la fabrication des bétons géopolymères.

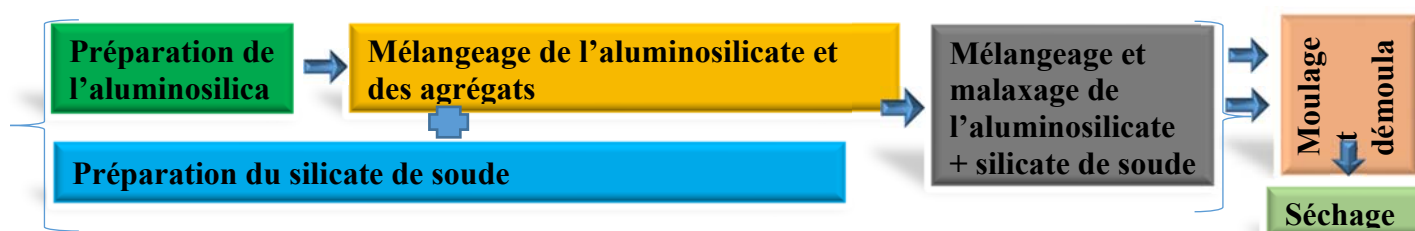


Figure 1: Procédure de fabrication des éprouvettes

2.3.1. Préparation de d'aluminosilicate

Cette procédure a pour but de mélanger soigneusement les différents constituants jusqu'à l'obtention d'une poudre homogène. Deux types de précurseurs aluminosilicatés présentant des apports en silice différents ont été comparés : la cendre de balle de riz et la pouzzolane naturelle.

Le mélange M1 est constitué de cendre de balle de riz, de métakaolin et de chaux, tandis que le mélange M2 comprend de la pouzzolane naturelle, du métakaolin et de la chaux.

Avant le mélange, le pesage est essentiel afin de garantir le respect des proportions de formulation. Après le pesage, les précurseurs et les additifs sont homogénéisés, puis incorporés au sable et au gravillon.



Photo 6 : Mélange de l'Aluminosilicate, du sable et des graviers

2.3.2. Préparation du silicate de soude

La préparation du silicate de soude consiste à dissoudre la soude dans une quantité d'eau déjà peser, puis à incorporer la cendre de balle de riz sous agitation continue jusqu'à obtention d'un mélange homogène. Cette opération provoque une réaction exothermique entraînant une augmentation de la température du mélange.

Le module silice-oxyde de sodium, noté R_m , est défini comme le rapport molaire entre le nombre de mole de dioxyde de silicium (SiO_2) et celle d'oxyde de sodium (Na_2O). [5]

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

2.3.3. Mélange et malaxage

Cette opération a pour objet de verser progressivement le silicate de soude dans le mélange aluminosilicaté préparé, tout en respectant les proportions définies par la formulation. Ensuite, le mélange est effectué avec soin pour assurer une répartition homogène de l'activateur et les constituants solides. Un malaxage est réalisé jusqu'à l'obtention d'une pâte uniforme et homogène.

2.3.4. Moulage et démoulage

Avant le coulage du mélange, le moule cylindrique, de 5 cm de diamètre et 10 cm de hauteur (rapport d'élancement égal à 2), est préparé par l'application d'un agent de démoulage afin de faciliter l'extraction de l'éprouvette après durcissement.

La figure suivante présente les opérations de préparation du moule cylindrique :



Photo 7 : Préparation de la moule cylindrique

Le béton frais est ensuite versé doucement par couches successives. Chaque couche est légèrement compactée à l'aide d'une tige métallique. Une fois le moule rempli, le béton est laissé en repos pendant 24 heures avant démoulage.

2.3.5. Séchage

Après le démoulage, les éprouvettes ont été mises à sécher à l'air libre, dans un environnement protégé du soleil direct, afin de permettre une évaporation progressive et naturelle de l'eau de gâchage.



Photo 8 : Séchage du béton géopolymère

III. RESULTATS ET DISCUSSIONS

Cette section est consacrée à la présentation, à l'analyse et à l'interprétation des résultats issus des essais mécaniques réalisés sur les éprouvettes. Plusieurs formulations de béton géopolymère ont été étudiées en faisant varier les proportions massiques de leurs constituants.

Afin de faciliter l'analyse expérimentale, les paramètres retenus sont regroupés dans le tableau suivant selon deux catégories : les paramètres fixes et les paramètres variables.

Tableau 1: Paramètre fixe et variable

Type de Paramètre	Nom du Paramètre	Valeur / Détail
FIXE	Température de calcination du kaolin	750 °C pendant 3h
	Température de calcination de la pouzzolane naturelle	700 °C pendant 2h
	Température d'incinération de balle de riz	600 °C
	Finesse de la cendre de balle de riz	< 0,04 mm
	Température de préparation du silicate de soude	Température ambiante
	Quantité de sable pour les éprouvettes	181,50 g
	Quantité de gravier pour les éprouvettes	378,00 g
	Âge des éprouvettes	7 jours et 28 jours
VARIABLE	Le rapport molaire silice / soude = $n \text{ SiO}_2 / n \text{ Na}_2\text{O}$	
	La quantité d'Aluminosilicate	
	La quantité du Silicate de Soude	
	La quantité de l'eau de gâchage	
	Influence du mode de conservation	

Après leur confection, les éprouvettes sont soumises à des essais mécaniques. La résistance à la compression est mesurée à l'aide d'une presse hydraulique de compression, permettant d'évaluer les performances mécaniques du béton géopolymère.



Photo 9 : Presse hydraulique d'essai de compression du béton

3.1. Résultats

Pour faciliter la comparaison entre les mélanges M1 et M2, les résultats obtenus sont regroupés sur une même courbe pour chaque étape de variation de la formulation.

3.1.1. Rapport molaire $n(\text{SiO}_2)/n(\text{Na}_2\text{O})$:

Pour notre expérimentation, nous avons testé plusieurs valeurs de R_m , à savoir : 1,40 ; 1,60 ; 1,80 ; 2,00 ; 2,20 et 2,40.

La fixation du rapport molaire permet de calculer le dosage de la soude, sachant que la formation d'une mole de NaO nécessite deux moles de NaOH. Le dosage molaire optimal de la silice est $n\text{SiO}_2 = 0,67 \text{ mol}$ [6]

Tableau 2: Variation du rapport molaire

R_m	$n\text{Na}_2\text{O}$	2mole NaOH
1,40	0,71	1,43
1,60	0,63	1,25
1,80	0,56	1,11
2,00	0,50	1,00
2,20	0,45	0,91
2,40	0,42	0,83

Le tableau et la figure ci-dessous présente l'évolution de la résistance à la compression en fonction du rapport molaire silice/soude.

Tableau 3: Les paramètres fixe utilisés pour la variation du rapport molaire

FIXE						
Mélange/Matière première (%)	CBR	PZ	MK	CX	SS	Eau
M1	13	-	8,5	8,5	35	35
M2	-	13	8,5	8,5	35	35

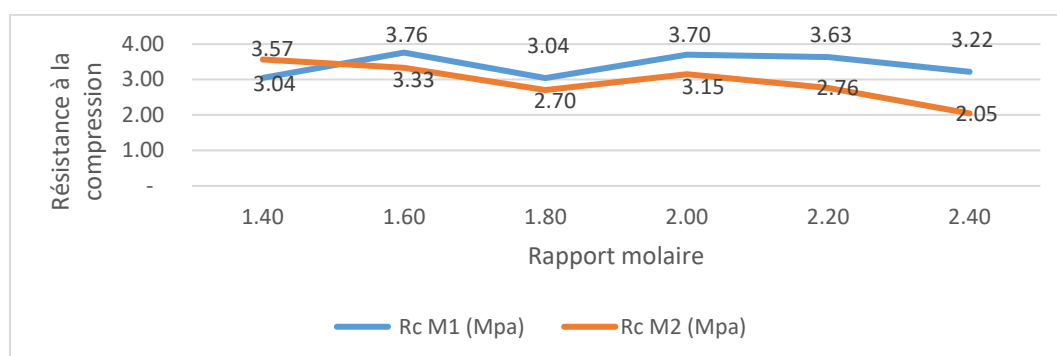


Figure 2: Comparaison de la résistance à la compression par rapport au $R_m = (\text{SiO}_2)/(\text{Na}_2\text{O})$

La trajectoire des deux courbes nous présente deux différentes tendance, l'une par l'évolution non linéaire mais indiquant un optimum bien marqué pour un rapport molaire égale à 1,60 ; ce qui explique l'existence des conditions nécessaire sur

l'amélioration de la phase de dissolution et l'hydrolyse ainsi que la présence de la libération des espèces activatrices. Pour la suite, nous observons une légère diminution de la résistance dû au manque de réaction provoquer par le silicate de soude.

Et l'autre courbe nous montre une décroissance presque linéaire qui approuve la dégradation des mécanismes de polycondensation ; et aussi que certaine élément de l'aluminosilicate n'est pas dissoute, mais on peut tirer quand même un maximum pour un rapport molaire égal à 1,40.

Pour mieux comparer les deux mélanges, nous avons utilisés les mêmes variations de rapport molaire, et nous constatons qu'elles ne se projettent pas sur une même fonction et les résistances en compression du mélange à base de cendre de balle de riz restent en dessus de celle à base de pouzzolane.

3.1.2. Quantité d'Aluminosilicate

La variation de la quantité d'aluminosilicate a pour objectif de déterminer une valeur de la résistance à la compression optimale. Elle permet d'étudier l'influence des proportions de chaque constituant et d'identifier le dosage le plus adapté.

Tableau 4: Les paramètres utilisés pour la variation de la quantité de l'aluminosilicate

Paramètre	Matière première	M1						M2					
FIXE	Rm	1,6						1,4					
	SS (%)	35						35					
	Eau (%)	35						35					
VARIABLE	CBR (%)	15	14	14	11,5	11,5	10	-	-	-	-	-	-
	PZ (%)	-	-	-	-	-	-	15	14	14	11,5	11,5	10
	MK (%)	7,5	8,5	7,5	10	8,5	10	7,5	8,5	7,5	10	8,5	10
	CX (%)	7,5	7,5	8,5	8,5	10	10	7,5	7,5	8,5	8,5	10	10

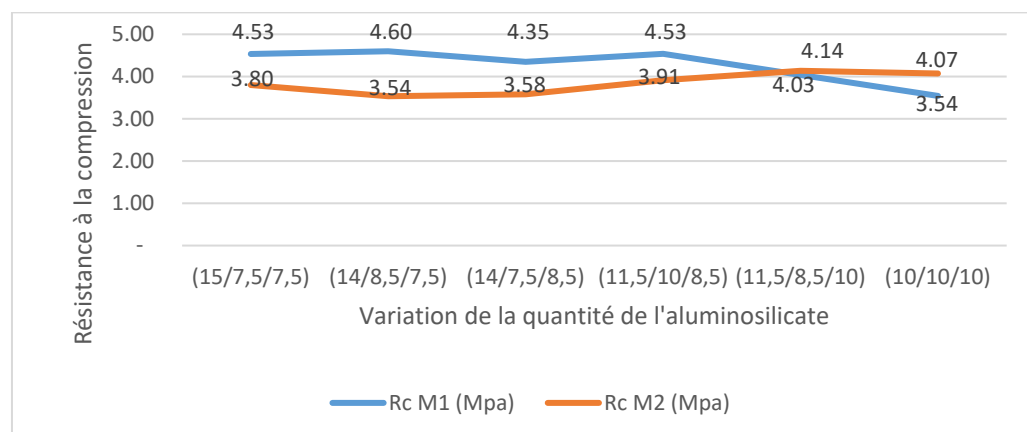


Figure 3: Comparaison de la résistance à la compression par rapport à la variation de la quantité d'aluminosilicate

Compte tenu de la fixation du rapport molaire vue au paravent, nous observons deux courbes plus ou moins stables pour la variation de la quantité d'aluminosilicate. Celle du mélange M1 présente une faible variation sur les quatre premières expériences qui explique une dissolution suffisante favorisant la formation du réseau géopolymère. Mais les deux derniers nous montrent

qu'il y a une faible baisse des valeurs en raison excessive des apports du MK et CX qui rendent défavorable au système. La proportion 14/8,5/7,5 est la plus performante qui offre une résistance à la compression de 4,60 MPa.

Concernant le mélange M2, la courbe nous relève aussi la même variation que celle du mélange à base de cendre de balle de riz, une tendance qui présente une légère fluctuation parmi les quatre premiers résultats. Mais contrairement au premier, l'augmentation de la quantité d'aluminosilicate contribue à enrichir le milieu réactionnel en espèces réactives, favorisant une restructuration plus homogène des oligomères aluminosilicatés, qui permet d'atteindre les valeurs les plus élevées de la série expérimentale égale à 4,14 MPa pour un pourcentage de 11,5/8,5/10.

Même si les variations en quantité d'aluminosilicate sont identiques, chaque matière première prend sa fonction due à la différence du rapport molaire choisi.

3.1.3. Quantité du Silicate de Soude et de l'eau de gâchage

La variation du silicate de soude et de l'eau de gâchage agit directement sur les comportements des matériaux à l'état frais et durci. Ces variations peuvent osciller en fonction de notre mélange

Tableau 5: Les paramètres utilisés pour la variation de la quantité du silicate de soude et l'eau de gâchage

Paramètre	Matière première	M1						M2					
FIXE	Rm	1,6						1,4					
	CBR (%)	14						-					
	PZ (%)	-						11,5					
	MK (%)	8,5						8,5					
	CX (%)	7,5						10					
VARIABLE	SS (%)	30	32	33	37	38	40	30	32	33	37	38	40
	Eau (%)	40	38	37	33	32	30	40	38	37	33	32	30

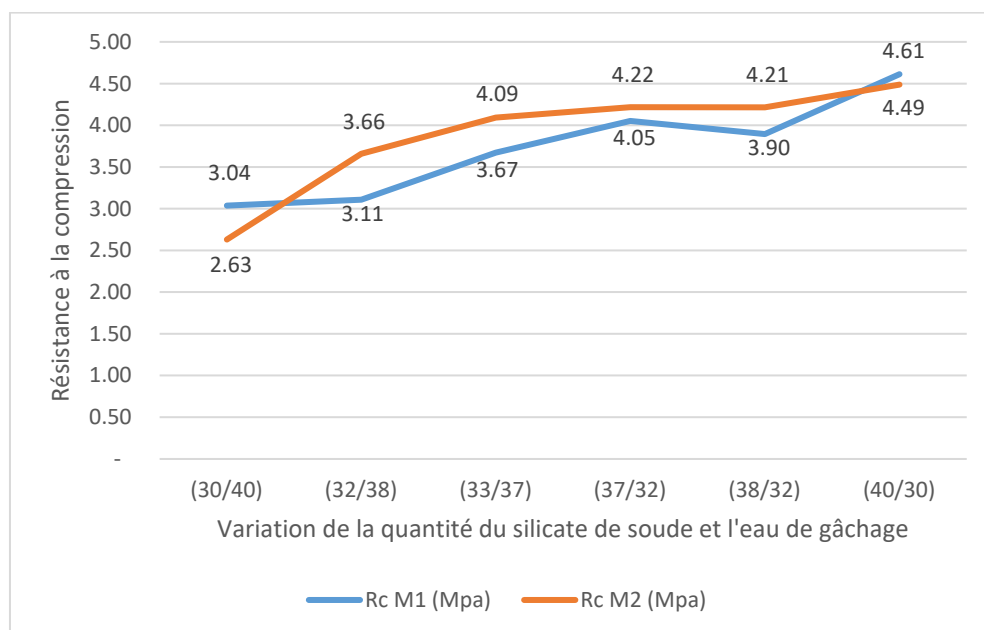


Figure 4: Comparaison de la résistance à la compression par rapport à la variation de la quantité du silicate de soude et l'eau de gâchage

En voyant la courbe, on observe que les deux mélanges ont des résultats en compression de tendance croissante mais présentent des comportements légèrement différents. Plus la quantité de silicate de soude augmente, la résistance en compression devient plus importante. Cela signifie que l'hydrolyse et la dissolution des aluminosilicates permettent une libération plus importante des espèces silicatées dans la solution activatrice. Donc, il y a une restructuration des espèces dissoutes ce qui favorise la formation d'oligomères et qui provoque l'amélioration de la qualité du gel.

Contrairement aux courbes de variation du rapport molaire et la quantité d'aluminosilicate, la courbe du mélange M2 surpasse celle de M1 sur une plage de variation 32/38 à 38/32. Mais finalement, cette dernière prend l'optimum pour une résistance en compression de 4,61 MPa.

3.1.4. Influence du mode de conservation

Le mode de conservation constitue un facteur clé pour l'évolution des propriétés mécaniques du béton. Les conditions de cure utilisées sont la conservation à l'air libre et l'immersion dans l'eau.

Tableau 6: Les paramètres utilisés pour les différents modes de conservation

Paramètre	Matière première	M1	M2
FIXE	Rm	1,6	1,4
	CBR (%)	14	-
	PZ (%)	-	11,5
	MK (%)	8,5	8,5