

21^e édition des Journées scientifiques
du Regroupement francophone pour la recherche et la formation sur le béton
(RF)²B

Polytechnique Montréal, Montréal, Canada
5 et 6 juillet 2023

INFLUENCE DU CCR ET DES CONDITIONS DE CURE SUR LES PROPRIÉTÉS PHYSICO-MÉCANIQUES DE BÉTON GÉOPOLYMÈRE SOUS UNE CURE À TEMPÉRATURE AMBIANTE

Yawo Daniel ADUFU^A, Seick Omar SORE^{A,B}, Philbert NSHIMIYIMANA^A, Adamah MESSAN^A, Gilles ESCADEILLAS^C

A Laboratoire Eco-Matériaux et Habitats Durables (LEMHaD), Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (Institut 2iE), Ouagadougou, Burkina Faso

B Département Génie Civil de l'Institut Universitaire de Technologie / Laboratoire de Chimie et Énergies Renouvelables (LaCER), Unité de Recherche en Physico Chimie et Technologie des Matériaux, Université Nazi BONI, Bobo Dioulasso, Burkina Faso

C Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions, INSA - Université Paul Sabatier, Toulouse, France

RÉSUMÉ : Le béton hydraulique reste le matériau de construction le plus utilisé de nos jours malgré le caractère très polluant de son principal liant, le ciment Portland. Cependant, des alternatives plus écologiques existent telles que les bétons géopolymères. Des études antérieures ont montré que de nombreux paramètres peuvent affecter les performances de ces derniers. La présente étude évalue spécifiquement les propriétés physico-mécaniques d'un béton géopolymère produit dans les conditions ambiantes à savoir une cure sous température contrôlée (20 ± 2 °C) et une cure à température ambiante non contrôlée (30 ± 5 °C) du laboratoire. Le béton géopolymère à base de métakaolin (MK) a été fabriqué en remplaçant partiellement le MK par 10 à 15 % en masse de CCR (résidu de carbure de calcium), un sous-produit industriel riche en chaux. Le béton a été caractérisé à l'état frais et à l'état durci après 7, 14 et 28 jours de cure. Les résultats indiquent que la température de cure a un effet significatif sur les propriétés physico-mécaniques des bétons géopolymères. Les temps de prise sont plus longs à 20 °C (> 2970 min) qu'à 30 °C (< 2500 min) pour tous les mélanges. À 7 jours, la résistance à la compression a augmenté de 77 % (6,1 à 10,8 MPa) et de 67 % (3,1 à 5,2 MPa), respectivement, pour les bétons contenant 0 et 15 % de CCR durcis entre 20 et 30 °C. À 14 jours, la résistance à la compression a augmenté de 26% (12 à 15,2 MPa) pour le béton contenant 15% de CCR lorsque la température de durcissement passe de 20 à 30 °C. Bien que leurs résistances à 7 jours soient inférieures par rapport au béton de référence, tous les échantillons contenant du CCR atteignent une meilleure résistance à partir du 14^e jour, quelle que soit la température de durcissement. La même tendance est observée à 28 jours où la formule contenant 15%CCR atteint des résistances comparables au béton hydraulique de classe courante (C20/25) couramment utilisé au Burkina faso pour les bâtiments d'habitation et qui sont dosés à 350kg/m³ de CEM II 42.5. Les résultats des analyses microstructurales indiquent que les produits de réaction sont essentiellement des zéolithes dont la structure est évolutive dans le temps.

1. INTRODUCTION

Les alternatives au béton hydraulique classique à base de ciment portland font l'objet de plus en plus de recherches au sein de la communauté scientifique compte tenu de son empreinte carbone élevé pour certains et l'indisponibilité de la matière première pour d'autres. Les matériaux alcalis activés en général et leur sous-classe les géopolymères en particulier ont montré leur potentiel comme matériaux alternatifs au regard non seulement de leurs performances mécaniques, environnementales et de durabilité vis à vie du béton hydraulique mais aussi pour la diversité des matières premières utilisables pour leur fabrication.

Parmi les facteurs pouvant affecter le bon déroulement des réactions de géopolymérisation, la concentration de l'activateur, les proportions stœchiométriques (ratios molaires) des aluminosilicates, composition chimique du précurseur ainsi que les conditions de maturation constituent les paramètres les plus influents. Les études antérieures (Sore *et al.*, 2016) ont démontré qu'une cure de 60°C environs pendant 24h s'avère nécessaire pour une bonne géopolymérisation. Certaines recherches ont proposé une approche pour la formulation de géopolymères à température ambiante mais force est de constater que ces conditions dites ambiantes ne tiennent pas compte des réalités climatiques de certaines régions du monde; les études conduites à température dites ambiantes se font majoritairement à 20°C (Askarian *et al.*, 2018). Dans notre zone d'étude, le Burkina Faso par exemple, les températures moyennes mensuelles tournent autour de 28°C. Il serait contre-productif de définir 20°C comme température ambiante dans ce cas de figure du fait de la forte sensibilité des réactions de géopolymérisation à la température; le risque étant d'inhiber les réactions tout en faisant abstraction du fort potentiel thermique de ces pays chauds.

Par ailleurs, il a été montré que la composition chimique du précurseur notamment le pourcentage des composées calciques réactifs (CaO) avait une incidence notable sur le déroulement des réactions surtout à jeune âge. Ainsi, des laitiers, des cendres volantes de classe C, la chaux, le ciment Portland ou le CCR qui ont tous en commun une concentration en CaO élevé ($\geq 30\%$), sont souvent utilisés en substitution partielle (entre 5 et 20% en masse) du précurseur pauvre en CaO ($\sim 10\%$), pour améliorer les résistances mécaniques du fait de la formation de produits de réactions additionnels notamment les C-A-S-H et des C-S-H (dans le cas où le ciment portland est utilisé en substitution) offrant donc une structure plus compacte, plus dense et plus résistant au matériau final fabriqué (Askarian *et al.*, 2018).

Au sein de cette famille de composés calcique, l'utilisation du CCR peut s'avérer plus bénéfique pour l'environnement. En effet, le CCR est un sous-produit industriel issu de la fabrication de l'acétylène présent dans bon nombre de produits plastiques tels que les PVC. Sa forte alcalinité constitue un problème majeur pour l'environnement tant il peut facilement contaminer les eaux souterraines lorsqu'il est mal entreposé. De nombreuses études ont tenté de valoriser le CCR en l'utilisant comme activateur ou substituant dans les géopolymères du fait de son potentiel alcalin élevé avec un pH supérieur à 12. Bien que ces études soient prometteuses, il serait judicieux que l'effet de la température de cure soit élucidé lorsque le CCR est utilisé dans la fabrication des géopolymères (Cong *et al.*, 2022).

Cette étude se propose d'étudier l'effet de deux niveaux de températures (dites ambiantes) de cure sur les propriétés physico-mécaniques d'un béton géopolymère à base d'argile calcinée et de résidu de carbure de calcium (CCR).

2. MATÉRIELS ET MÉTHODES EXPÉRIMENTALES

L'argile calcinée provient de la ville de Ouagadougou. L'argile prélevée à Saaba (une localité de la ville de Ouagadougou au Burkina Faso) a été préalablement séché, broyé, tamisé puis calciné à 700°C pendant 3 heures. La vitesse de montée lors de la calcination de l'argile est de 10°C/min jusqu'à 700°C. Cette température est ensuite maintenue constante pendant 3h. Le refroidissement s'est fait lentement jusqu'à la température ambiante. Les analyses infrarouge (Figure 1) et DRX (Figure 2) effectués sur l'argile brute ainsi que sur le l'argile calcinée montrent que la calcination a été effective avec la transformation de la kaolinite en métakaolin.

Le CCR a été récupéré sur le site d'entreposage d'une entreprise de la place en tant que déchet industriel exposé à l'air libre. Il est séché au soleil, broyé et tamisé au tamis 80µm. Les analyses DRX et infrarouges révèlent que le CCR est riche en Portlandite et en calcite.

La composition chimique des matériaux présentée dans le tableau 1 indique que le CCR est très riche en CaO (plus de 66%) alors que l'argile calcinée n'en contient que des traces (0,1%). L'argile calcinée est majoritairement composée de SiO₂ et de Al₂O₃ à un taux cumulé de 96,2%. Les résultats des analyses granulométriques au laser sont indiqués dans le tableau 2. L'analyse des densités spécifiques indiquent que le CCR est moins dense que l'argile calcinée.

Tableau 1 Composition chimique de l'argile et du CCR

Oxydes (%wt)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	MgO	MnO ₃	TiO ₂	P ₂ O ₃	LOI	Total
Argile calcinée	57,85	38,3	0,05	2,3	0,2	0,11	0,08	0,01	0,08	0,02	1	100
CCR	4,7	1,7	66,3	0,7	0,1	0	0,3	0	0	0	26,2	100

Tableau 2 Caractéristiques physiques du CCR et du Métakaolin

Matériau	Densité spécifique (g/cm ³)	Granulométrie aux rayons laser		
		D ₁₀ (µm)	D ₅₀ (µm)	D ₉₀ (µm)
MK	2,67	2,00	10,93	38,71
CCR	2,42	2,53	12,65	39,29

Le sable utilisé a été prélevé dans un lit de rivière tandis que le gravier a été obtenu auprès d'une entreprise locale spécialisée dans le concassage et la commercialisation de granulats de granite. L'analyse granulométrique présentée à la Figure 3 montre que le sable a une granulométrie étalée ce qui le rend particulièrement adapté pour la fabrication de bétons. Le gravier en revanche présente une granulométrie plus ou moins uniforme.

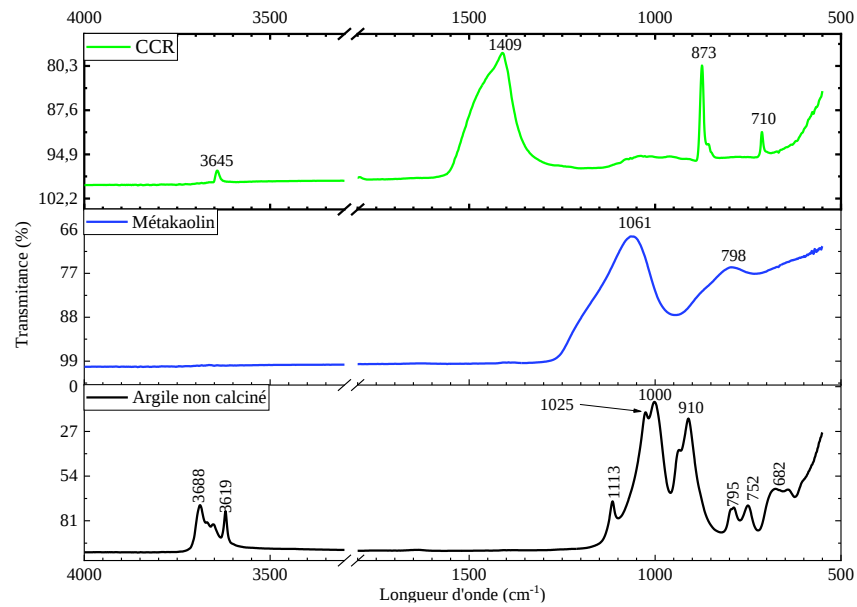


Figure 1 : Analyse infrarouge des matériaux de base

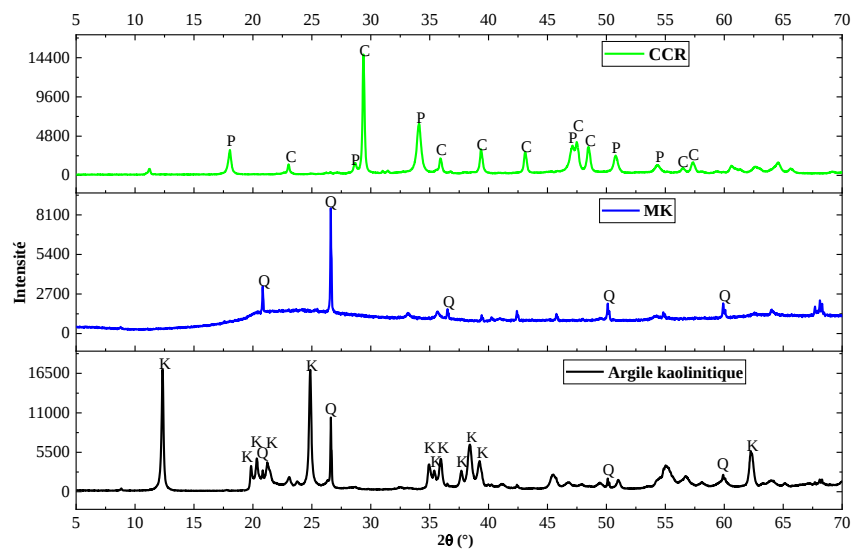


Figure 2 : Diagramme DRX des matériaux de base : Q : Quartz; P : Portlandite; C : Calcite; K : Kaolinite

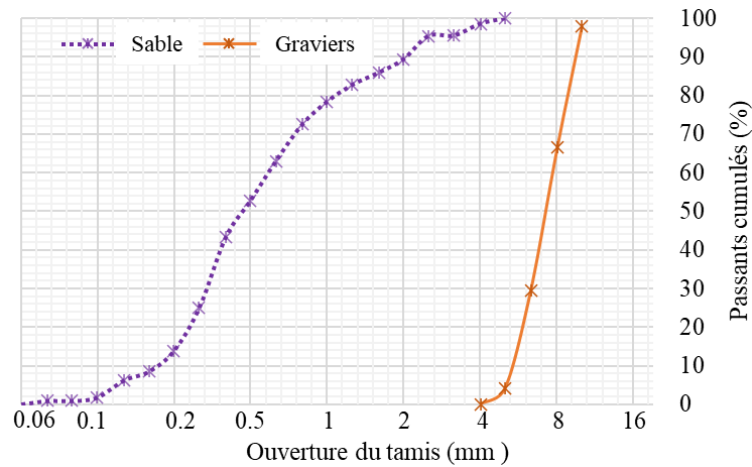


Figure 3 : Courbe granulométrique des granulats

La solution alcaline est de l'hydroxyde de Sodium de concentration 12M. Elle est obtenue par dissolution de cristaux de NaOH de degré de pureté 99% dans de l'eau distillée 24h avant son utilisation.

2.1 Méthode expérimentale

La composition du béton géopolymère est présentée au Tableau 3. Une formulation similaire a été utilisée par (Cao *et al.*, 2018a). La formulation de base est un béton géopolymère dont le précurseur est uniquement composé de poudre de métakaolin (argile calcinée) activé avec du NaOH ; du sable et du gravier et est notée 100%MK. Par la suite, une partie du métakaolin est substituée en masse par le carbure de calcium résiduel (CCR) à raison de 5, 10 et 15%. Des études précédentes ont montré que le taux de substitution des composés calciques se situe autour de 15%.

La première étape de la formulation des bétons consiste à mélanger ensemble les granulats (gravier + sable) ainsi que le précurseur (MK+CCR). Après homogénéisation du mélange, la solution d'hydroxyde de sodium est ajoutée progressivement pendant que le malaxage se poursuit dans le malaxeur électrique. Le temps de malaxage est de cinq minutes suivies de la détermination de la consistance des différentes formulations.

Tableau 3 Composition des différents bétons

Matériaux (kg/m ³)	100MK	5%CCR	10%CCR	15%CCR
MK	350	333	315	298
CCR	0	18	35	53
NaOH (cristaux)	126	126	126	126
Eau	229	229	229	229
Sable	723	723	723	723
Gravier	958	958	958	958

La consistance du béton a été déterminée par la mesure de l'affaissement au mini-cône d'Abram's conformément à la norme française NF EN 12350-2 Avril 2012. Les essais de mesure de la résistance en compression sont réalisés sur des éprouvettes cylindriques de 50mm×100mm conformément à la norme NF EN 12390-1 juillet 2021. La mise en place dans les moules se fait sur une table à choc en deux couches de 60 coups chacune. Le démoulage des éprouvettes se fait 24h après la fin de prise. Le temps de prise considéré correspond au temps de fin de prise observé sur l'appareil de VICAT sur les parties liantes des bétons (même composition que le béton à l'exception des agrégats).

La détermination du temps de prise s'est fait comme suit : Après malaxage, la pâte géopolymère a été mise dans deux moules VICAT. La détermination du temps de prise se fait à 20°C sur l'une des moules et à 30°C sur l'autre.

De même que pour le temps de prise, les éprouvettes de béton seront conservées dans ces deux environnements distincts (20°C et 30°C) et recouvertes d'une bâche pour limiter les déperditions d'eau jusqu'à la date de maturation souhaitée.

L'analyse microstructurale est constituée des analyses DRX et infrarouges sur les pâtes à différents âges de maturation à 30°C. L'essai DRX a été réalisé avec le diffractomètre D8 Advance BRUKER en utilisant la radiation $\text{CuK}\alpha$ ($\lambda_{\text{K}\alpha} = 0,154186 \text{ nm}$) avec un pas d'acquisition de $0,02^\circ$ (2θ) entre 4° et 70° . Les données recueillies ont été analysées avec le logiciel Eva et les phases cristallisées ont été identifiées par comparaison avec les standards PDF (Powder Diffraction Files) de ICDD (International Center for Diffraction Data). L'analyse infrarouge a été effectuée à travers un spectromètre infrarouge à transformée de Fourier en mode ATR (Attenuated Total Reflectance) et les données sont recueillies et traitées par le logiciel OMNIC™.

3. RÉSULTATS ET DISCUSSION

3.1 Temps de prise

Les résultats du début et de la fin de prise Vicat sur les pâtes (Figure 4) indiquent que les temps de début et de fin de prise de la pâte de référence 100%MK n'ont pas été affectés par la température de cure. Ainsi, que ce soit à 20 ou 30°C, la pâte de référence fait prise entre 545 et 745 minutes. Lorsque le métakaolin est remplacé par le CCR, les temps de prise connaissent une augmentation quelle que soit la température à laquelle s'effectue l'essai. A 20°C, l'ajout de CCR à 10% a entraîné une augmentation du temps de début de prise de 545 minutes à 1265 minutes soit une augmentation de 132%. La même observation est faite sur le temps de fin de prise à 20°C : le temps de fin de prise passe 750 minutes à 4450 minutes (+493%).

Par ailleurs, lorsque la température de conservation passe de 20 à 30°C, les temps de fin de prise connaissent une baisse significative. A 10% de CCR, le temps de fin de prise passe de 4450 minutes à 1790 minutes (-60%). Seuls les débuts de prise ne sont pas impactés par la température de cure.

De nombreux phénomènes entrent en jeu au cours de la prise des géopolymères. Dans la plupart des cas, l'ajout de composés calciques engendrent une prise plus rapide des pâtes géopolymères par la formation des hydrates tels les C-A-S-H. Les produits calciques susceptible de provoquer des réactions exothermiques tels que les ciments portlands accélèrent les prises des pâtes géopolymères par la mise en contribution de la chaleur excessive dégagée au cours de la réaction (Cao et al., 2018b). Le CCR étant très riche en CaO , le retard de prise qu'il entraîne entre en contradiction avec ces observations de la littérature scientifique. De plus, les résultats indiquent que lorsque le CCR est introduit dans la pâte géopolymère, le temps de prise est fortement affecté comparativement à la pâte témoin contenant 100%MK. Ces observations pourraient être liées à l'alcalinité du CCR qui est l'un des caractéristiques du CCR. En effet, il a été démontré dans les études précédentes (Das and Shrivastava, 2021) que malgré qu'un milieu hautement alcalin soit nécessaire pour le bon déroulement de la géopolymérisation, un milieu trop alcalin a plutôt tendance à l'empêcher. Le retard supplémentaire de la prise observée lorsque la température passe de 30 à 20°C ne serait qu'une amplification de ce phénomène déjà engendré par l'alcalinité additionnelle apportée par l'ajout du CCR.

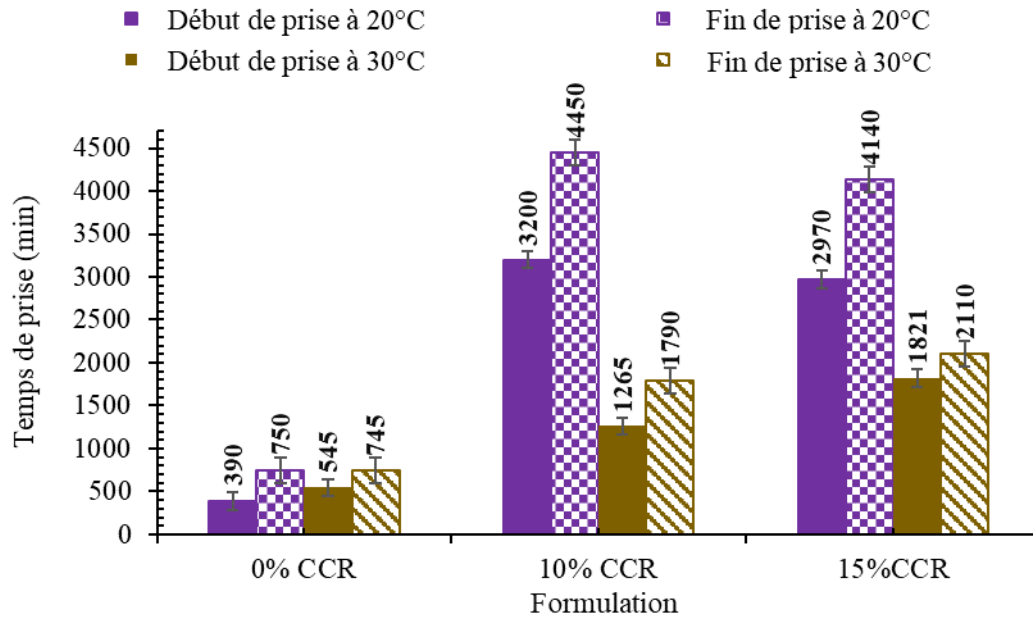


Figure 4 Temps de prise des pâtes

3.2 Ouvrabilité et masses volumiques apparentes

L'ajout de CCR a tendance à baisser l'ouvrabilité du béton géopolymère (Figure 5). Les paramètres influençant l'ouvrabilité sont essentiellement les surfaces spécifique des matériaux qui sont liées à la forme et à la finesse des particules les constituants. Le **Tableau 2** indique que le CCR et le métakaolin ont sensiblement la même finesse. La demande en eau plus élevée du CCR par rapport au MK pourrait être liée à la surface spécifique qu'il convient de déterminer. Par ailleurs, la différence de densité spécifique entre le MK et le CCR pourrait aussi être à l'origine de la baisse de l'ouvrabilité observée. En effet, la méthode de formulation de béton adoptée consiste en une substitution massique. Le **Tableau 2** indique que le CCR est 10,33% moins dense que le MK. Ainsi, pour 15% de substitution de MK par le CCR, l'apport de CCR représenterait 10,33% de volume d'équivalent de MK supplémentaire pour la même quantité de solution de NaOH. Ceci pourrait être l'une des raisons pour laquelle l'on observe une baisse d'ouvrabilité lorsque le MK est substitué par le CCR.

La densité apparente des bétons dans les deux conditions de cure est d'environ 2 200 kg/m³ pour toutes les formulations indiquant ainsi que les bétons conservés à 30°C n'ont pas souffert d'une perte d'eau supplémentaire par rapport à ceux conservés à 20°C.

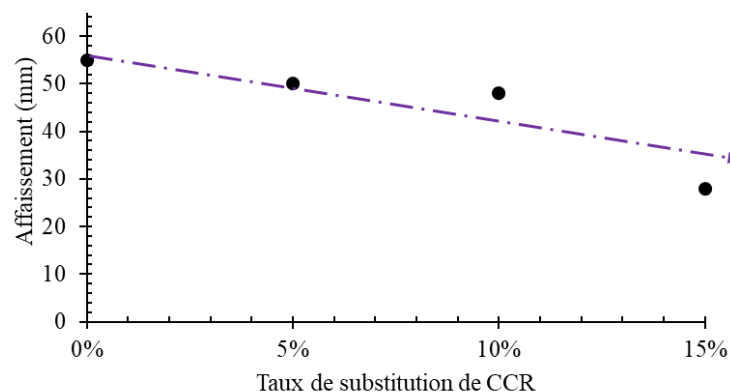


Figure 5 : Ouvrabilité des bétons

3.3 Résistances mécaniques

A 7 jours, le béton témoin a une résistance de 6,1 et 10,8 MPa, respectivement, à 20 et 30 °C. Bien que les temps de prise soient similaires, une augmentation de 10 °C de la température de cure, entraîne un gain de résistance de + 76 %. Entre 7 et 14 jours, le gain de résistance du béton témoin est de l'ordre de 48 % et 38 % pour les bétons conservés à 20° et 30 °C, respectivement (Figure 6). Cela montre que le béton conservé à 30 °C semble atteindre sa résistance à la compression plus rapidement que celui conservé à 20 °C. De plus, la substitution du MK par le CCR a conduit à une diminution de la résistance du béton géopolymère pour les deux températures de cure, à 7 jours. Cette diminution de la résistance est liée à l'augmentation du temps de prise causée par le CCR : un temps de prise plus long peut résulter de la lenteur des réactions entraînant une apparition tardive des produits de réaction et par conséquent des résistances à jeune âge plus faibles. Cette observation est confirmée par les résistances à 7 jours plus élevées des échantillons conservés à 30 °C par rapport à ceux conservés à 20 °C. A 7 jours, le béton contenant 10% de CCR a une résistance à 30° supérieure de 72% à sa valeur à 20 °C, soit une augmentation de 3,1 à 5,3 MPa. A 14 jours, le béton contenant 15% de CCR présente une amélioration de la résistance à la compression plus importante que le béton contenant 10% de CCR. Entre le 7^e et le 14^e jour, sa résistance passe de 3,1 à 12 MPa (+ 287 %) et de 5,2 à 15,2 MPa (+ 192 %) lorsqu'il est stocké à 20 °C et à 30 °C, respectivement. Bien que les résistances à 7 jours soient inférieures à celles du béton de référence, tous les échantillons contenant du CCR tendent à surpasser le béton de référence au jour 14. Une observation similaire a été faite à 28 jours où tous les échantillons contenant du CCR ont montré une résistance à la compression plus élevée que le béton de référence, quelles que soient les conditions de cure. Ainsi, malgré une résistance initiale de 5,2 MPa à 7 jours, le béton contenant 15%CCR atteint une résistance de 19.2 MPa assez proche des bétons hydrauliques couramment utilisés (20 MPa) pour la réalisation des ouvrages courants. De ces observations, on peut conclure que le sous-produit industriel CCR tend à améliorer les performances mécaniques du béton géopolymère à température ambiante.

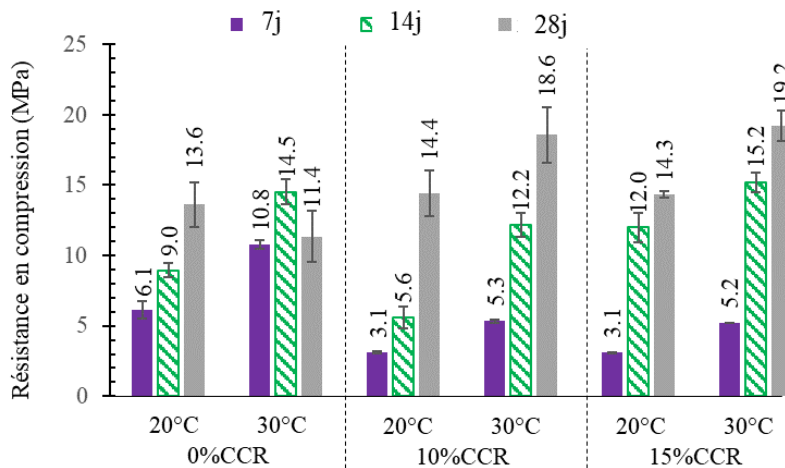


Figure 6 : Résistance en compression des bétons géopolymères

3.4 Analyses microstructurales

Les résultats des analyses infrarouges sont présentés à la Figure 7 et à la Figure 8. Les résultats indiquent l'apparition de nouveaux pics observés autour de 3350 cm^{-1} et sur les pâtes correspondant aux groupement H-O-H sous forme libre ou lié. La bande d'absorption autour de 1645 cm^{-1} correspond aux vibrations des groupes O-H (Liu *et al.*, 2020). Les pics observés autour de 745 cm^{-1} correspondent aux vibrations des liaisons Si-O-Al avec des atomes de Al dans une coordination tétraédrique. A 7 jours, la bande autour de 745 cm^{-1} n'est pas assez visible. Elles commencent à apparaître clairement au 28^{ème} jour montrant ainsi l'évolution des réactions de géopolymérisation au-delà du 7^e jours. Les pics observés autour de 1400 cm^{-1} correspondent aux vibration des groupements C-O indiquant une carbonatation de la pâte géopolymère.

L'on notera que cette carbonatation augmente avec le taux de CCR mais ils tendent à diminuer avec le temps. Ainsi, ce pic est plus prononcé à 7 jours qu'à 90 jours sur la pâte contenant 15%CCR. La bande d'absorption située autour de 960-971 cm^{-1} correspond aux vibrations de l'allongement symétrique et asymétrique des liaisons Si-O-Si et Si-O-Al et met en évidence une empreinte majeure de la matrice géopolymère (Elimbi *et al.*, 2014) puisque les bandes correspondantes aux liaisons Si-O-Si et Si-O-Al du métakaolin passent de 1061 à 970 environs.

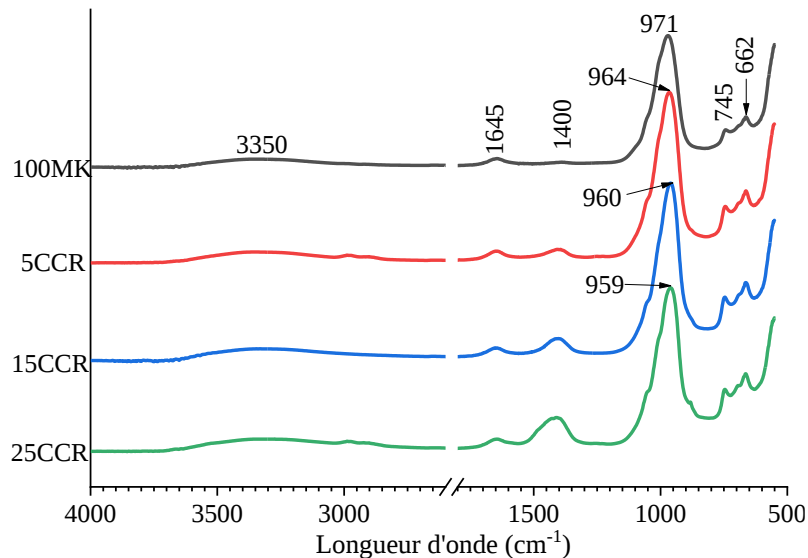


Figure 7 : Analyse infrarouge sur les pâtes géopolymères (90 jours)

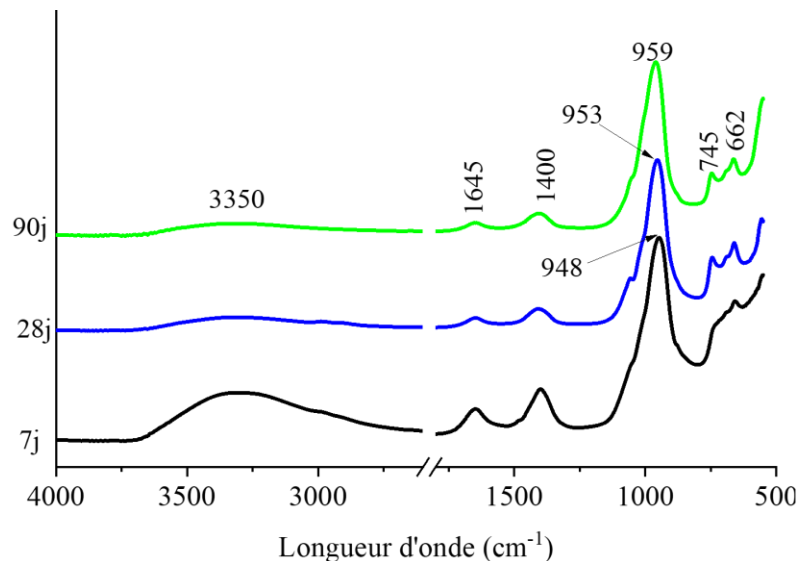


Figure 8 : Analyse infrarouge sur la pâte géopolymère 15CCR

Les diagrammes DRX des matériaux sont présentés à la Figure 9 et à la Figure 10. Ces résultats indiquent que les principaux produits de réaction sont des Zéolithes de type A et de type X avec apparition de l'Heulandite-Ca autour de 12° pour les pâtes contenant du CCR. Par ailleurs, les résultats de la Figure 10 indiquent que les Zéolithes de type X se formeraient plus rapidement que les zéolithes de type A. L'on note aussi que les diagrammes DRX évoluent (autour de 10° ; 15° ; 23° et 26°) notablement entre le 28^e et le 90^e jours. Ces observations pourraient laisser présager une meilleure résistance du béton géopolymère au-delà du 28^e jours lorsque le CCR est utilisé en substitution du métakaolin.

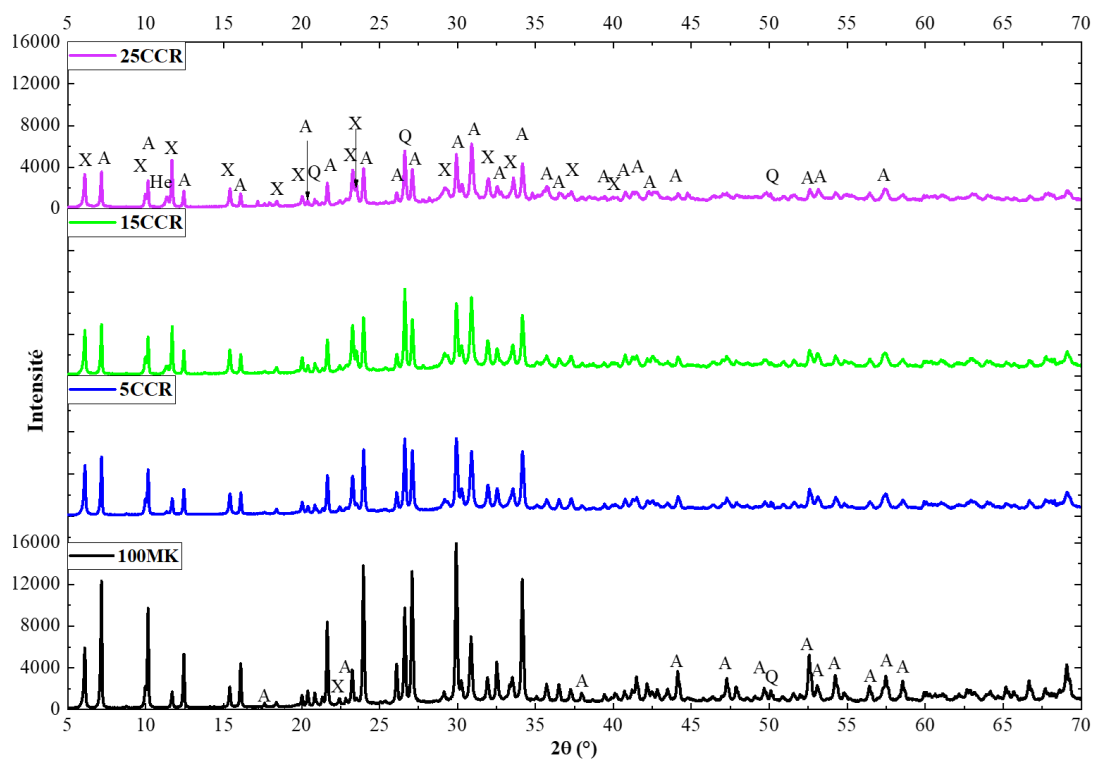


Figure 9 : Diagramme DRX des pâtes géopolymères X : Zéolithe X; A : Zéolithe A; He : Heulandite-Ca; Q : Quartz

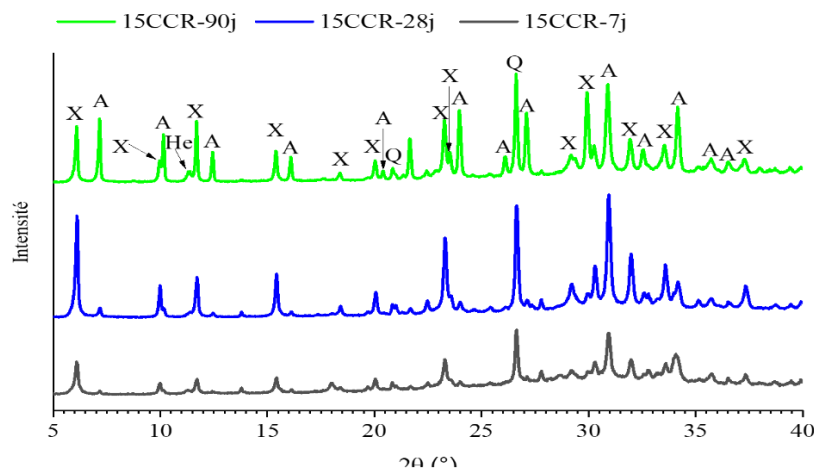


Figure 10 : Diagramme DRX des pâtes géopolymères X : Zéolithe X; A : Zéolithe A; Q : Quartz

4. CONCLUSION

Cette étude avait pour objectif d'étudier l'effet de la température de cure sur les propriétés physiques et mécaniques de bétons géopolymères à base de métakaolin et d'un sous-produit industriel le CCR. Les résultats indiquent que l'ajout du CCR ainsi que la température de conservation ont eu divers effets sur les bétons :

- L'ajout de CCR a engendré une baisse de l'ouvrabilité des bétons

- L'ajout de CCR a engendré une augmentation du temps de prise des bétons géopolymères.
- Lorsque les bétons sont conservés à 20°C, leurs temps de prise est beaucoup plus long que lorsqu'ils sont conservés à 30°C
- La résistance à la compression est améliorée d'environ 60 % pour le béton témoin 100%MK et de 25 % pour le béton contenant 15 % de CCR à 14 jours, lorsque la température de conservation passe de 20 à 30 °C. A 28jours, le Béton contenant 15%CCR atteint une résistance de 19.2 MPa et pourrait être utilisé pour des ouvrages courants.
- L'étude de la microstructure révèle que les Principaux produits de réactions sont des zéolites de type A et X cohabitant avec des produits de carbonatation caractéristique des géopolymères. Ces résultats montrent également une évolution de la microstructure au cours du temps tels que l'apparition de nouveaux produits de réaction tels que l'Heulandite-Ca ainsi que les liaisons Si-O-Al détectés autour de 745 cm⁻¹ au-delà du 7è jours justifiant ainsi l'amélioration majeure des résistances mécaniques au cours du temps.

5. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Askarian, M. et al. (2018) 'Mechanical properties of ambient cured one-part hybrid OPC- geopolymer concrete', *Construction and Building Materials*, 186, pp. 330–337. doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.07.160.
- Cao, Y.F. et al. (2018a) 'Effect of calcium aluminate cement on geopolymer concrete cured at ambient temperature', *Construction and Building Materials*, 191, pp. 242–252. doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.09.204.
- Cao, Y.F. et al. (2018b) 'Effect of calcium aluminate cement on geopolymer concrete cured at ambient temperature', *Construction and Building Materials*, 191, pp. 242–252. doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.09.204.
- Cong, P. et al. (2022) 'Mechanical, microstructure and reaction process of calcium carbide slag- waste red brick powder based alkali-activated materials (CWAAMs)', *Journal of Cleaner Production*, 331. doi:10.1016/j.jclepro.2021.129845.
- Das, S.K. and Shrivastava, S. (2021) 'Influence of molarity and alkali mixture ratio on ambient temperature cured waste cement concrete based geopolymer mortar', *Construction and Building Materials*, 301. doi:10.1016/j.conbuildmat.2021.124380.
- Seick Omar Sore, Adamah Messan, Elodie Prud'homme, Gilles Escadeillas, François Tsobnang, " Synthesi and characterization of geopolymer binders based on local materials from Burkina Faso – Metakaolin and rice husk ash" *Construction and Building Materials* 124 (2016) 301–311, <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.07.102>.